



NOVAS FERRAMENTAS PARA A AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA ESTÁTICA E DINÂMICA DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

Nícolas Abreu Rocha Leite Netto

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Tatiana Mariano Lessa de Assis
Sergio Gomes Jr.

Rio de Janeiro
Dezembro de 2016

NOVAS FERRAMENTAS PARA A AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA ESTÁTICA
E DINÂMICA DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

Nícolas Abreu Rocha Leite Netto

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE
ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Tatiana Mariano Lessa de Assis, D.Sc.

Prof. Sergio Gomes Jr., D.Sc.

Prof. Glauco Nery Taranto, Ph.D.

Prof. Zulmar Soares Machado Júnior, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
DEZEMBRO DE 2016

Netto, Nicolás Abreu Rocha Leite

Novas Ferramentas para a Avaliação de Segurança Estática e Dinâmica de Sistemas de Potência/Nícolas Abreu Rocha Leite Netto. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

XX, 153 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Tatiana Mariano Lessa de Assis

Sergio Gomes Jr.

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 125 – 130.

1. Região de Segurança Estática. 2. Região de Segurança Dinâmica. 3. Região de Segurança a Pequenos Sinais. 4. Anarede. 5. Anatem. I. Assis, Tatiana Mariano Lessa de *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

*A Lucas,
meu irmão*

Vision without implementation is hallucination
– *Provérbio Anônimo* –

Agradecimentos

Inicialmente, agradeço a Deus pelas oportunidades que me foram dadas, assim como toda a ajuda que obtive durante este árduo caminho. À minha família - meu pai José, minha mãe Zilmar e meu irmão Lucas - por ser pedra fundamental, a partir da qual tudo mais se construiu.

Aos meus orientadores - professora Tatiana e professor Sergio Gomes - por me guiarem durante o processo da elaboração deste trabalho, com a boa vontade que qualquer orientado poderia desejar em ter de seus orientadores.

Aos meus colegas de Cepel: Beatriz, Eduardo e Renan. Ao Thiago Masseran, por ter me auxiliado no desenvolvimento de parte da dissertação. A Lígia por ter revisado este trabalho. Ao meu chefe Fabricio, por todo o incentivo oferecido. E à minha namorada Paula, pelas corretas inserções e contribuições nesta dissertação (dentre muitas outras coisas).

Aos pesquisadores do Cepel Luiz Antonio Cordeiro e Marcelo Rosado pelos casos do SIN oriundos do tempo real.

Ao excelente amigo André Maske, pela contribuição, em mais esta ocasião.

Aos colegas de representação discente da época da graduação, Mario e Leandro, a quem devo bastante.

A todos os amigos e colegas da faculdade e da vida, pois todos vocês são responsáveis por eu ser quem sou atualmente.

À equipe do COPPETEX.

Ao Cepel por brevemente ter me oferecido bolsa durante o mestrado, além de permitido e incentivado quando passei a atuar como pesquisador pela instituição.

A todos vocês, os meus mais sinceros e eternos agradecimentos.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

NOVAS FERRAMENTAS PARA A AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA ESTÁTICA E DINÂMICA DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

Nícolas Abreu Rocha Leite Netto

Dezembro/2016

Orientadores: Tatiana Mariano Lessa de Assis

Sergio Gomes Jr.

Programa: Engenharia Elétrica

Apresenta-se, neste trabalho, três novas ferramentas para a avaliação de segurança de sistemas de potência: Região de Segurança com Estimação do Amortecimento do Sistema, Fluxo de Potência Continuado com Informação de Segurança e Simulação Cronológica de Casos. Para a estimação do amortecimento, apresenta-se três métodos capazes de extrair informação de amortecimento dos sinais oriundos de simulação não-linear no tempo. A construção das curvas do Fluxo de Potência Continuado é revista, incluindo informações relativas a segurança do sistema, como estabilidade frente a contingências e violações de variáveis do sistema. Apresenta-se, ainda, uma ferramenta nova capaz de realizar avaliações sequenciais de segurança em um sistema com diferentes configurações topológicas e pontos de operação. Para a validação, utilizou-se um sistema de 9 barras e variações do Sistema Interligado Nacional, incluindo um caso em que o sistema foi extraído do tempo real pela plataforma SAGE. Todas as ferramentas foram implementadas nos programas computacionais Anarede e Anatem do Cepel, visando também a utilização em computação distribuída.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

NEW TOOLS FOR STATIC AND DYNAMIC SECURITY ASSESSMENT OF POWER SYSTEMS

Nícolas Abreu Rocha Leite Netto

December/2016

Advisors: Tatiana Mariano Lessa de Assis

Sergio Gomes Jr.

Department: Electrical Engineering

In this work, it is presented three new tools to evaluate power system security: Security Region with System Damping Estimation, Continuation Power Flow with Security Information and Chronological Simulation of Cases. For damping estimation, it is presented three methods capable of extracting information of damping from nonlinear time-signals from time-domain simulation nonlinear signals. Continuation Power Flow curves construction is reviewed, including information relating to system security, as stability given contingencies and system variables violations. It is also presented a new tool capable of performing sequential security assessments in a system with different topological configurations and operating points. For validation, it is used a 9 buses system and Brazilian Interconnected System variations, including a case in which the system was extracted from real time by SAGE platform. All tools were implemented in computer programs Anarede and Anatem also aiming for use in distributed computing.

Sumário

Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xvi
Lista de Símbolos	xviii
Lista de Abreviaturas	xix
1 Introdução	1
1.1 Objetivo da Dissertação	2
1.2 Estrutura da Dissertação	2
2 Conceitos de Estabilidade e de Segurança para Sistemas Elétricos de Potência	4
2.1 Estabilidade de Sistemas de Potência	4
2.1.1 Estabilidade Angular	6
2.1.2 Estabilidade de Frequência	8
2.1.3 Estabilidade de Tensão	9
2.2 Segurança de Sistemas de Potência	10
2.2.1 Estabilidade, Segurança e Confiabilidade	12
2.2.2 Ferramentas Utilizadas para a Avaliação de Segurança	13
2.3 Região de Segurança pelo Método dos Nomogramas nos Programas Anarede e Anatem	17
3 Método dos Nomogramas para Avaliação de Amortecimento do Sistema	20
3.1 Proposta	20
3.2 Métodos para a Estimação do Amortecimento	21
3.2.1 Método dos Picos-Sucessivos	23
3.2.2 Método de Prony	27
3.2.3 <i>Eigensystem Realization Algorithm</i> (ERA)	30
3.2.4 Comparação entre os Métodos	34

3.3	Implementação Computacional	43
3.3.1	SSA pelo Anatem	43
3.3.2	Implementação no Anatem	46
3.3.3	Programas Auxiliares Desenvolvidos	49
3.4	Região de Segurança com Estimação do Amortecimento do Sistema .	52
3.4.1	Exemplo 9 Barras	53
3.4.2	Exemplo Sistema Interligado Nacional	54
3.5	Conclusões Parciais	60
4	Região de Segurança via Fluxo de Potência Continuado	61
4.1	Proposta	61
4.2	Fluxo de Potência Continuado	62
4.2.1	Resumo do Algoritmo	66
4.2.2	Fluxo de Potência Continuado com Contingência	67
4.2.3	Fluxo de Potência Continuado com Informação de Segurança .	69
4.3	Implementação Computacional	75
4.3.1	Conjunto de Dados no Anarede	75
4.3.2	Algoritmo de Solução	77
4.3.3	Arquivos de Saída e Resultados	79
4.4	Testes para o FPC com Informação de Segurança	81
4.4.1	Exemplo 9 Barras	81
4.4.2	Exemplo Sistema Interligado Nacional	84
4.5	Conclusões Parciais	92
5	Região de Segurança via Simulação Cronológica de Casos	93
5.1	Proposta	93
5.2	Implementação Computacional	95
5.2.1	Conjunto de Dados no Anarede	96
5.2.2	Algoritmo de Solução	98
5.3	Implicações da Simulação Cronológica para o Anatem	100
5.3.1	Preparação de Casos para Simulação no Anatem	100
5.3.2	Interface entre os Dados Estáticos e Dinâmicos	102
5.3.3	Geradores Individualizados, Número de Máquinas e Fator de Participação	103
5.3.4	Conversão Automática de Sinais de Exportação em Sinais de Saída	104
5.3.5	Definição de Valor Padrão para Sinais Oriundos de Locais Re- motos de Medição	105
5.3.6	Controladores com Inicialização Inviável	107
5.3.7	Problemas de Convergência	108

5.4	Simulação Cronológica com Informação de Segurança	113
5.4.1	Exemplo 9 Barras	114
5.4.2	Exemplo Sistema Interligado Nacional	117
5.5	Conclusões Parciais	122
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	123
	Referências Bibliográficas	125
A	Comparação dos Métodos de Estimação de Amortecimento para Algumas Classes de Sinais	131
A.1	Sinal Simples	131
A.2	Sinal Multi-Modal	136
A.3	Sinal com Ruído	142
B	Código Fonte de Alguns Algoritmos Desenvolvidos	149
B.1	Código Matlab do Método dos Picos Sucessivos	149
B.2	Código Fortran de Lista Encadeada de Reais	152

Lista de Figuras

2.1	Classificação da Estabilidade em Sistemas de Potência	6
2.2	Nomogramas genéricos para o DSA	16
2.3	Nomograma da RSE para o grupo $G_2 \times G_3$	18
3.1	Diagrama Unifilar do Caso 9 Barras	36
3.2	Resposta no Tempo para um Curto 3ϕ na LT4-5 do Sistema 9 Barras	36
3.3	Exponencial Envoltória gerada pelo Método dos Picos-Sucessivos para um sinal não-linear de frequência	38
3.4	Exponencial Envoltória gerada pelo Método dos Picos-Sucessivos para um sinal não-linear de δ	39
3.5	Comparação do sinais normalizados de frequência e δ com a realização encontrada, para $T_s = 10ms$	42
3.6	Fluxo de dados no programa Anarede para VSA/DSA	44
3.7	Fluxo de dados no programa RunManager para DSA	45
3.8	Fluxo de dados nos programas Anavis e AnaviSSA para DSA	45
3.9	Fluxo de dados no programa Anatem para SSA	46
3.10	Exemplo de arquivo .txt do DSA	49
3.11	Exemplo de arquivo .fssa do SSA	49
3.12	Exemplo de trecho de um arquivo .ssa	50
3.13	Nomograma exemplo de SSA	51
3.14	Recurso <i>scatter</i> para auxílio da leitura dos nomogramas	51
3.15	Recursos de visualização complementares do SSA_Viewer	52
3.16	Nomograma para $G_2 \times G_3$ do caso “9 Barras”	53
3.17	Comparação dos amortecimentos mínimos encontrados pelo PacDyn e pelo Anatem	53
3.18	Nomograma de amortecimento para o caso SAGE Equivalente - sistema íntegro	55
3.19	Nomograma de amortecimento para o caso SAGE Equivalente - caso em contingência	55
3.20	Nomograma de amortecimento para o caso SAGE Equivalente - sistema íntegro e caso em contingência	56

3.21	Nomograma de amortecimento para o par $G2 \times G3$ e em contingência	57
3.22	Comparação dos amortecimentos mínimos encontrados pelo método QR e pelo método DPSE	59
3.23	Comparação dos amortecimentos mínimos encontrados pelo método QR e pelo método ERA no Anatem	59
4.1	Ilustração do esquema preditor-corretor do FPC	63
4.2	Fluxograma do algoritmo do Fluxo de Potência Continuado	66
4.3	Ilustração do esquema preditor-corretor do Fluxo de Potência Continuado com Contingência	67
4.4	Fluxograma do algoritmo do Fluxo de Potência Continuado com Contingência	68
4.5	Ilustração da proposta de Curva PV com Informação de Segurança .	70
4.6	Ilustração da Curva PV com Informação de Segurança	71
4.7	Ilustração definitiva da Curva PV com Informação de Segurança . . .	72
4.8	Ilustração da Curva PV com modelo ZIP	73
4.9	Ilustração da Curva PV com Informação de Segurança e modelo ZIP	74
4.10	Ilustração corrigida da Curva PV com Informação de Segurança e modelo ZIP	74
4.11	Exemplo da utilização do código DDIN	77
4.12	Fluxo de dados no programa Anarede para o FPC com Informação de Segurança	78
4.13	Exemplo de trecho de um arquivo .plt oriundo do FPC com Informação de Segurança	80
4.14	Segurança Estática para Curva PV do Sistema 9 Barras	82
4.15	Segurança Dinâmica para Curva PV do Sistema 9 Barras	82
4.16	Segurança Estática para Curva PV do Sistema 9 Barras (ctg)	83
4.17	Segurança Dinâmica para Curva PV do Sistema 9 Barras (ctg)	83
4.18	Segurança Estática para Curva PV do Sistema SIN	85
4.19	Curvas PV para CS e CER do Sistema SIN	85
4.20	Diferença na convergência das etapas VSA e DSA	86
4.21	Número de violações encontradas para a etapa VSA	87
4.22	Mínimo amortecimento encontrado pelo método ERA no FPC	88
4.23	Mínimo amortecimento para algumas contingências	88
4.24	Comparação da resposta no tempo de alguns patamares	89
4.25	Janela da simulação utilizada para estimação	89
4.26	Bloco não-linear MAX do regulador de tensão	90
4.27	Observação do surgimento do ciclo limite	91
4.28	Observação do sinal X8 alternando do sinal X7 para o sinal VR	91

5.1	Avaliação de Segurança para uma sequência de casos	94
5.2	Exemplo da utilização do código DSIC	97
5.3	Fluxo de dados no programa Anarede para a Simulação Cronológica .	98
5.4	Exemplo de trecho de um arquivo .plt oriundo do SimCron	99
5.5	Etapas tradicionais no ajuste de casos de estabilidade do Anatem . .	101
5.6	Mensagens no relatório do Anatem para elementos ignorados no caso	102
5.7	Dados de associação de modelos de máquinas e controladores	103
5.8	Dados de associação de modelos de máquinas e controladores com as opções DGEI e IERR	104
5.9	Dados de associação de modelos e controladores da UTE TermoNorte II	104
5.10	Diferença entre os CDUs 4742 e 94742 do banco de dados do ONS . .	105
5.11	Mensagem no relatório do Anatem para blocos EXPORT convertidos em SAIDA	105
5.12	Exemplo de utilização do parâmetro P2 do bloco IMPORT	106
5.13	Exemplo de utilização do parâmetro D2 do DEFVAL	106
5.14	Mensagens no relatório do Anatem para controladores não inicializados	108
5.15	Mensagens no relatório do Anatem para a comutação automática para Newton	109
5.16	Fluxograma do processo iterativo do Anatem	110
5.17	Fluxograma do processo iterativo do Anatem considerando opções para melhoria de convergência	111
5.18	Erro obtido ao comparar o efeito da opção SAD3	112
5.19	Etapas para a simulação de casos de estabilidade do Anatem com novos recursos	113
5.20	Curva de Carga para o caso 9 Barras	114
5.21	SimCron para o caso “9 Barras” com informação de segurança estática	115
5.22	SimCron para o caso “9 Barras” com informação de segurança dinâmica	116
5.23	Variação da quantidade de circuitos ligados para o caso do SIN	117
5.24	SimCron para o caso SIN com informação de segurança estática . . .	118
5.25	SimCron para o caso SIN com informação de segurança estática (.plt)	119
5.26	SimCron para o caso SIN com informação de segurança dinâmica . .	120
5.27	Violação dinâmica para o primeiro patamar do caso SimCron do SIN	120
5.28	Sinal de tensão da barra 4517 para o primeiro patamar do caso Sim- Cron do SIN	121
5.29	SimCron para o caso SIN com informação de segurança dinâmica (.plt)	121
A.1	Representação gráfica do sinal simples a ser testado	131
A.2	Influência do intervalo de amostragem no Método dos Picos-Sucessivos	132
A.3	Representação gráfica do sinal multi-modal a ser testado	137

A.4	Exponencial Envoltória gerada pelo Método dos Picos-Sucessivos para um sinal multi-modal	138
A.5	Representação gráfica do sinal com ruído ser testado e a parcela ruidosa	143
A.6	Influência do intervalo de amostragem no Método dos Picos-Sucessivos	143

Lista de Tabelas

3.1	Polos encontrado pelo PacDyn para o Sistema “9 Barras” sem a LT4-5	37
3.2	Resultado do modo encontrado para o sinal não-linear de frequência pelo Método dos Picos-Sucessivos para diferentes intervalos de amostragem	37
3.3	Resultado do modo encontrado para o sinal não-linear de δ pelo Método dos Picos-Sucessivos para diferentes intervalos de amostragem	38
3.4	Resultado do Método de Prony para o sinal não-linear de frequência, $p = 9$ e diferentes intervalos de amostragem T_s	39
3.5	Resultado do Método de Prony para o sinal não-linear de δ , $p = 9$ e diferentes intervalos de amostragem T_s	40
3.6	Resultado do Método ERA para frequência com diferentes T_s	41
3.7	Resultado do Método ERA para δ com diferentes T_s	41
3.8	Parâmetros utilizados para o método ERA no caso “9 Barras”	54
4.1	Lista de contingências estáticas a serem aplicadas no caso do SIN	84
5.1	Efeito da opção SAD3 sobre o tempo computacional	112
5.2	Lista de contingências a serem aplicadas no caso do SIN	118
A.1	Resultado do modo encontrado para o sinal simples pelo Método dos Picos-Sucessivos para diferentes intervalos de amostragem	132
A.2	Resultado do Método de Prony para o sinal simples com $p = 5$ e diferentes intervalos de amostragem T_s	133
A.3	Resultado do Método de Prony para o sinal simples com $T_s = 100ms$ e diferentes ordens p da realização	134
A.4	Resultado do Método ERA para o sinal simples com diferentes intervalos de amostragem T_s	135
A.5	Comparação entre os métodos para o sinal simples e $T_s = 100ms$	136
A.6	Resultado do modo encontrado para o sinal multi-modal pelo Método dos Picos-Sucessivos para diferentes intervalos de amostragem	137

A.7	Resultado do Método de Prony para o sinal multi-modal com $p = 7$ e diferentes intervalos de amostragem T_s	138
A.8	Resultado do Método de Prony para o sinal multi-modal com $T_s =$ $300ms$ e diferentes ordens p da realização	139
A.9	Resultado do Método ERA para o sinal multi-modal com diferentes intervalos de amostragem T_s	141
A.10	Comparação entre os métodos para o sinal multi-modal e $T_s = 300ms$	142
A.11	Resultado do modo encontrado para o sinal com ruído pelo Método dos Picos-Sucessivos para diferentes intervalos de amostragem	143
A.12	Resultado do Método de Prony para o sinal com ruído, $p = 5$ e diferentes intervalos de amostragem T_s	144
A.13	Resultado do Método ERA para o sinal com ruído com diferentes intervalos de amostragem T_s e $\varepsilon = 10^{-16}$	145
A.14	Resultado do Método ERA para o sinal simples com diferentes inter- valos de amostragem T_s e $\varepsilon = 10^{-4}$	148

Lista de Símbolos

B_{km}	Parte imaginária do elemento km da matriz de admitância, p. 64
G_{km}	Parte real do elemento km da matriz de admitância, p. 64
$H(\cdot)$	Operador Hessiano de uma função, p. 24
P_G	Parcela ativa da geração, p. 15
P_ℓ	Parcela ativa da carga, p. 62
Q_ℓ	Parcela reativa da carga, p. 62
T_s	<i>Time Sampling</i> ou Intervalo de Amostragem, p. 37
V_k	Tensão na barra k , p. 64
$\text{Im}(\cdot)$	Parte imaginária do argumento complexo, p. 27
Ψ	Matriz de autovetores à direita, p. 34
$\text{Re}(\cdot)$	Parte real do argumento complexo, p. 22
δ	Ângulo de carregamento, p. 36
$\det(\cdot)$	Determinante da matriz-argumento, p. 24
γ	Parâmetro de coerência modal, p. 34
λ_c	Parâmetro de continuidade, p. 62
λ	Modo do sistema ou auto-valor de uma matriz, p. 22
$\nabla(\cdot)$	Operador Gradiente, p. 24
$\overline{\psi}_i^T$	i -ésima linha da matriz inversa de autovetores à direita, p. 34
θ_{km}	Diferença angular entre as barras k e m , p. 64
ξ	Amortecimento de um polo, equipamento ou sistema, p. 22
pp	Ponto percentual, p. 19

Lista de Abreviaturas

Anarede	Programa de Análise de Redes, p. 2
Anatem/ERA	Implementação do método ERA no programa Anatem, p. 52
Anatem	Análise de Transitórios Eletromecânicos, p. 2
CDU	Controle Definido pelo Usuário, p. 100
CER	Compensador Estático de Reativo, p. 84
CS	Compensador Síncrono, p. 84
Cepel	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, p. 2
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i> , p. 26
DSA	<i>Dynamic Security Assessment</i> ou Avaliação de Segurança Dinâmica, p. 11
ERA	<i>Eigensystem Realization Algorithm</i> , p. 30
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> , p. 26
FPC	Fluxo de Potência Continuado, p. 61
LPM	Linear Prediction Model, p. 28
MIMO	<i>Multiple-input/multiple-output</i> , p. 31
NERC	<i>North American Electric Reliability Corporation</i> , p. 12
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico, p. 1
PAR	Plano de Ampliação e Reforços, p. 84
PVRS	Curva PV com Região de Segurança, p. 61
RSE	Região de Segurança Estática, p. 17
Reger	Rede de Gerenciamento de Energia, p. 113

SAGE	Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia, p. 52
SCADA/EMS	<i>Supervisory Control and Data Acquisition System / Energy Management System</i> , p. 113
SEP	Sistema Elétrico de Potência, p. 1
SIN	Sistema Interligado Nacional, p. 1
SNR	<i>Signal-Noise Ratio</i> , p. 30
SSC	Sistema de Supervisão e Controle, p. 113
SimCron	Simulação Cronológica de Casos, p. 94
VSA	<i>Voltage Security Assessment</i> , p. 17

Capítulo 1

Introdução

Num cenário de crescente expansão econômica, também será crescente a demanda por energia. Os Sistemas Elétricos de Potência (SEPs) devem estar preparados para acompanhar tal evolução, fornecendo energia elétrica para os mais diversificados setores das sociedades. Conforme se ampliam as regiões ou grupos para os quais estes sistemas atendem, exigências quanto à qualidade da energia oferecida surgem, bem como a contínua oferta e a segurança em sua transmissão.

De forma a aumentar a confiabilidade dos sistemas e atender aos padrões mais elevados de qualidade, os SEPs historicamente interconectaram-se dando origem aos chamados Sistemas Interligados. No caso brasileiro em particular, denomina-se Sistema Interligado Nacional (SIN) o SEP que atende a maior parte da extensão territorial do país.

Naturalmente, o SIN apresenta-se como um sistema complexo, dotado de diversos elementos e componentes elétricos. Pode-se destacar que na base de dados de referência para estudos de estabilidade (Fevereiro de 2016) disponibilizado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), há quase 6 mil barramentos, dos quais 600 são de geração[1].

Analisar sistemas de tal dimensão pode-se mostrar uma tarefa laboriosa e especialmente complicada. É indispensável, pois, o uso de programas computacionais que sejam capazes de sintetizar as condições presentes e futuras do sistema, através de modelos matemáticos específicos para cada tipo de estudo.

Para a operação do sistema, deseja-se ferramentas computacionais capazes de amostrar o estado do sistema (as grandezas físicas que definem o modelo matemático) e avaliar um grande número de situações às quais este sistema está exposto (contexto *online*). É imprescindível ao operador que todas as informações relativas à qualidade e segurança da operação do sistema estejam disponíveis da maneira mais sintética possível.

Para o analista que planeja a operação do sistema, deseja-se ferramentas igualmente capazes de avaliar sob diferentes cenários o sistema de interesse, mas também

ferramentas que auxiliem na previsão e correção de problemas que são passíveis de ocorrerem.

Para ambos os usuários, a qualidade de uma análise feita para determinado sistema é consequência da precisão da informação resultante, bem como da facilidade de sua interpretação. As ferramentas de análise dos sistemas precisarão ser, portanto, matematicamente bem definidas, céleres, e capazes de gerar gráficos, tabelas e relatórios com a síntese da situação dos sistemas estudados.

Tem-se, pois, como norte no desenvolvimento de programas computacionais para a avaliação de um SEP a evolução na modelagem matemática de algoritmos, de ferramentas e da forma como se apresentam.

1.1 Objetivo da Dissertação

Deseja-se apresentar com este trabalho três novas ferramentas para compor o pacote de Avaliação de Segurança dos programas computacionais Anarede (Programa de Análise de Redes) e Anatem (Análise de Transitórios Eletromecânicos), ambos desenvolvidos pelo Departamento de Redes Elétricas do Cepel (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica), pertencente ao grupo Eletrobras.

Estende-se o conceito de segurança estática e dinâmica dos nomogramas gerados por estes programas para a ferramenta do Fluxo de Potência Continuado (Fluxo de Potência Continuado com Informação de Segurança) e para uma nova ferramenta chamada Simulação Cronológica de Casos.

Também se aprimora os nomogramas gerados pelo par Anarede/Anatem[2] com um método capaz de obter a informação de amortecimento estimado das máquinas do sistema, à semelhança da ferramenta de Nomogramas de Amortecimento desenvolvida para o PacDyn (também desenvolvido pelo Cepel)[3].

Essas ferramentas foram pensadas de maneira que o operador ou analista possam, visualmente através de gráficos e nomogramas bem marcados, melhor compreender a situação dos diversos pontos possíveis do sistema, sob a ótica da segurança dos SEPs.

1.2 Estrutura da Dissertação

Este trabalho está organizado num total de 6 capítulos, com a seguinte disposição:

No capítulo 2, apresenta-se as definições encontradas na literatura para a segurança dos SEPs, bem como as definições utilizadas nos programas Anarede e Anatem para a determinação das regiões de segurança.

No capítulo 3, apresenta-se três métodos distintos cujo objetivo é de se estimar o amortecimento linear das máquinas de um sistema, para dado ponto de opera-

ção. Fazendo uso destes métodos, gera-se também nomogramas semelhantes dos já apresentados pelo Anarede e Anatem, aproveitando-se a estrutura de mapeamento e paralelização encontrada em tais programas para a determinação da Região de Segurança Estática e Dinâmica. Apresenta-se também um programa desenvolvido para a visualização desses nomogramas de amortecimento.

No capítulo 4, apresenta-se uma revisão do Fluxo de Potência Continuado de maneira a representar, simultaneamente, as informações de segurança de cada um dos pontos obtidos no traçado da curva PV no programa Anarede.

No capítulo 5, apresenta-se uma nova ferramenta denominada Simulação Cronológica de Casos. Com esta ferramenta, é possível analisar diversos casos, podendo diferir nos mais variados parâmetros, considerando-se os critérios de segurança especificados.

No capítulo 6, apresenta-se as considerações finais e sugestões de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Conceitos de Estabilidade e de Segurança para Sistemas Elétricos de Potência

Neste capítulo serão apresentadas as definições clássicas para estabilidade e segurança utilizadas no âmbito dos Sistemas Elétricos de Potência. Os conceitos e definições apresentados neste capítulo são uma breve revisão dos trabalhos realizados por uma força-tarefa do IEEE/CIGRÉ[4] e publicação temática da IEEE Power & Energy Magazine[5].

2.1 Estabilidade de Sistemas de Potência

A estabilidade de um sistema, no sentido de Lyapunov[6], é definida a partir do comportamento dinâmico em torno de determinado ponto de equilíbrio. Para um ponto de equilíbrio estável, as variáveis de estado que definem o sistema devem oscilar confinadas dentro de uma região arbitrária. A estabilidade dos Sistemas Elétricos de Potência, em particular, é definida por Kundur et al.[4]:

Definição 1. A estabilidade de um sistema de potência é a capacidade de um SEP de, para uma dada condição inicial de operação, recuperar o equilíbrio após ser submetido a um distúrbio físico, com a maior parte das variáveis do sistema limitadas de maneira que o sistema inteiro se mantenha intacto, praticamente.

(tradução livre)

A definição apresentada é referente ao sistema como um todo. Contudo, também é de interesse observar se geradores individuais (ou outros equipamentos dinâmicos) são estáveis. É possível que um gerador perca a estabilidade (ou sincronismo) sem provocar o colapso do restante do sistema.

A natureza dos SEPs é fortemente não-linear e variante no tempo. Parâmetros do sistema (como carga, geração e elementos manobráveis) estão constantemente sofrendo alterações, conforme a demanda e atuação de controladores. Remete, pois, à definição de estabilidade dada por Lyapunov: os SEPs têm as variáveis que definem seus estados oscilando em torno de algum ponto de equilíbrio.

Os distúrbios físicos aos quais os SEPs estão sujeitos podem ser classificados em duas categorias: as grandes e as pequenas perturbações.

A classificação entre grande ou pequena perturbação é subjetiva e qualitativa. Pode-se, contudo, considerar que para pequenos distúrbios a estabilidade do sistema é independente de sua magnitude, enquanto que para um grande distúrbio, a estabilidade depende intimamente da magnitude da perturbação aplicada. Em geral, são pequenas as perturbações que alterem parâmetros do sistema de maneira gradativa ou pontual, usualmente mudança em valores de referência de controladores ou mesmo a variação contínua de carga que existe. São grandes as perturbações que alterem estado operativo de circuitos ou geradores; como curtos-circuitos e atuações de relés. Para alguns eventos, como o chaveamento de um determinado reator, poderá ser considerado como uma pequena ou uma grande perturbação, dependendo do ponto do sistema em que é aplicado tal evento.

Independentemente da magnitude do distúrbio, o sistema irá responder ao estímulo com a dinâmica de suas variáveis. Dependendo das condições, essas variáveis podem tomar uma trajetória que venha a romper a região de estabilidade daquele ponto de equilíbrio. A estabilidade do sistema, portanto, é relativa a cada um dos tipos de acontecimentos possíveis bem como à própria natureza dinâmica do sistema.

Considerando toda a sorte de eventos possíveis a que um sistema está sujeito, é inviável projetá-lo com o objetivo de garantir que o mesmo se mantenha estável sempre; é, pois, inviável garantir a *estabilidade global* do sistema[7].

De fato, a definição 1 considera que para a estabilidade de um SEP, é possível o sistema se recuperar de um distúrbio e não se manter totalmente íntegro ao mesmo tempo. A estabilidade referida quando se trata de Sistemas Elétricos de Potência é, portanto, *condicional* ou *local*[7].

Mesmo considerando que a estabilidade do sistema não será global, o estudo da estabilidade local torna-se extremamente complexo devido às dimensões do modelo matemático dos SEPs. A análise da estabilidade, enquanto estudo viável, é imensamente facilitada ao identificar elementos-chave que contribuem para a instabilidade e ao se classificar em categorias apropriadas. A significância das análises realizadas é, portanto, dependente da qualidade da classificação estabelecida, uma vez que ao se reduzir o problema para um conjunto menor de variáveis, estuda-se a estabilidade *parcial* do sistema[8].

A classificação da estabilidade de SEPs leva em consideração a natureza física

do modo instável que surge, a amplitude da perturbação considerada e a janela de tempo em que se observa o sistema. A fig. 2.1 mostra um panorama da classificação da estabilidade de sistemas de potência, considerando a natureza da grandeza física envolvida e a magnitude da perturbação considerada. A descrição de cada categoria e subcategoria segue.

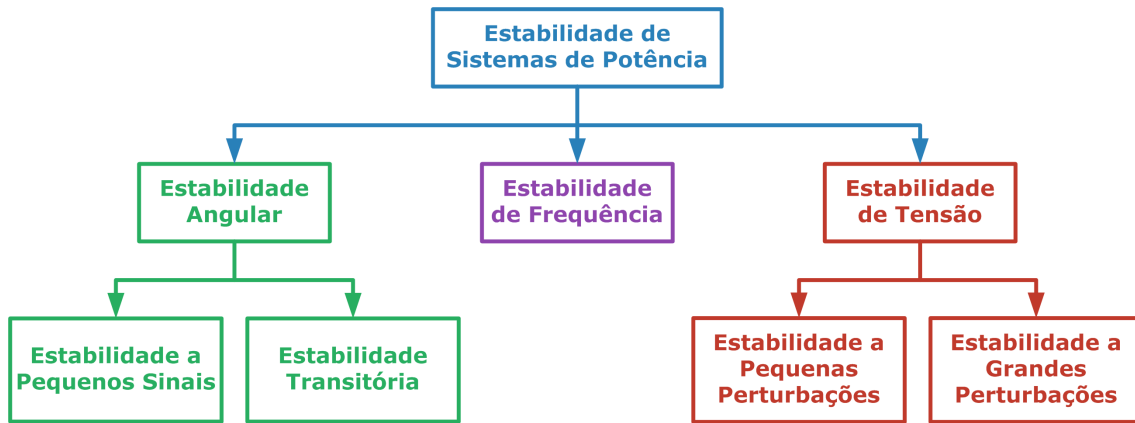


Figura 2.1: Classificação da Estabilidade em Sistemas de Potência

2.1.1 Estabilidade Angular

Definição 2. A estabilidade angular (*rotor angle stability*) se refere à capacidade das máquinas síncronas de manter o sincronismo após o SEP a que estão conectadas ser submetido a um distúrbio.

O problema da estabilidade angular diz respeito ao estudo das oscilações eletromecânicas inerentes aos sistemas de potência. Diz respeito, principalmente, na habilidade de cada máquina síncrona do sistema de manter ou recuperar o equilíbrio entre o torque eletromagnético e o torque mecânico.

Quando submetido à uma perturbação, os rotores das máquinas síncronas são acelerados ou desacelerados de acordo com suas leis de movimento. Se uma máquina está acelerada em relação a outra, a diferença angular entre elas aumenta. A instabilidade angular acontece quando é notado um aumento (irreversível) na diferença angular, que pode ser referente a uma máquina e o restante do sistema ou entre um grupo de máquinas.

Embora seja referente às máquinas síncronas; máquinas de indução, compensadores síncronos e demais equipamentos com dinâmica contribuem para o fenômeno da estabilidade angular.

Pode-se associar ao desbalanço do torque mecânico com o torque eletromagnético a duas componentes: torque sincronizante (*synchronizing torque*) e o torque de amortecimento (*damping torque*). A estabilidade angular do sistema depende da existência dessas duas componentes em cada máquina síncrona. Torque sincro-

nizante insuficiente leva a uma instabilidade aperiódica, enquanto que torque de amortecimento insuficiente leva a uma instabilidade oscilatória.

Para fins de conveniência, divide-se o estudo da estabilidade angular em duas subcategorias: a estabilidade a pequenos sinais e a estabilidade transitória.

Estabilidade a Pequenos Sinais

A estabilidade a pequenos sinais diz respeito à capacidade do sistema manter-se em sincronismo após submetido a uma pequena perturbação. São consideradas pequenas as perturbações que permitem que a linearização das equações do sistema (que é altamente não-linear) sejam representativas.

A estabilidade a pequenos sinais é dependente do ponto de operação do sistema. Usualmente, a instabilidade a pequenos sinais aparece devido ao amortecimento insuficiente das oscilações. Instabilidades aperiódicas também são possíveis, mas costumam estar ligadas à operação das máquinas que atingiram seus limites de excitação.

Deve-se observar que, embora a característica das oscilações do sistema seja muito bem definida para pequenos distúrbios, as oscilações podem ser significativamente modificadas em função do distúrbio aplicado. Um amortecimento considerado adequado pode se tornar inadequado com a aplicação de um distúrbio de grande magnitude, ou vice-versa, já que o ponto de operação pós-distúrbio pode ser significativamente alterado e durante o regime transitório do distúrbio há o efeito das não linearidades do sistema.

Os problemas referentes à estabilidade de pequenos sinais podem ser tantos locais quanto globais. Quando a oscilação observada é referente a uma máquina contra o resto do sistema, denomina-se modo de oscilação como *local*. Quando a oscilação é observada apenas dentro da planta da usina, onde máquinas oscilam umas contra as outras, denomina-se modo de oscilação como *intraplanta*. Por fim, quando a oscilação observada é referente a um grupo de máquinas do sistema contra outro grupo de máquinas, denomina-se modo de oscilação *multimáquina*. No caso particular em que os grupos oscilam em oposição de fase, costuma-se denominar tal modo de oscilação de *interárea*.

Estabilidade Transitória

A estabilidade transitória diz respeito à capacidade do sistema de se manter em sincronismo após submetido a uma grande perturbação, como um curto-circuito ou a abertura de um circuito. A resposta do sistema envolve grandes excursões dos valores do ângulo de carregamento das máquinas, que são influenciadas pela relação não-linear entre a potência e o ângulo de carregamento.

A estabilidade transitória é dependente tanto do ponto de operação do sistema quanto da natureza e gravidade da perturbação aplicada. Curtos-circuitos podem ser, por exemplo, trifásicos (usualmente mais severos) e monofásicos (usualmente menos severos).

A instabilidade usualmente aparece na forma de crescimento aperiódico do ângulo de carregamento de alguma máquina, devido ao torque sincronizante insuficiente. Pode ser resultado também da superposição entre modos interárea lentos e modos locais ou mesmo modos específicos afetados por não-linearidades, como a saturação de equipamentos e controladores.

2.1.2 Estabilidade de Frequência

Definição 3. A estabilidade de frequência (*frequency stability*) se refere à capacidade de um SEP de manter a frequência elétrica estável, mesmo após submetido a algum evento que leve a um grande desbalanço de carga e geração.

Os SEPs estão sujeitos a grandes contingenciamentos de carga ou geração. Quando, por exemplo, alguma grande usina é desconectada do sistema ou quando um grande corredor é aberto (como a interligação Norte-Sul), observa-se uma variação da frequência elétrica que até então estava em equilíbrio. Em tais condições, ao menos localmente, há um desbalanço entre a geração e a carga, provocando um excursionamento no valor da frequência, com efeitos em outras variáveis do sistema como o fluxo nos circuitos e a tensão nos barramentos.

É uma situação comum de ser observada em sistemas interconectados que por ventura fiquem ilhados dado algum evento. A estabilidade, neste caso, é observada para cada uma das ilhas, que deverão alcançar o equilíbrio individualmente.

Durante as excursões no valor da frequência, as magnitudes das tensões dos barramentos podem variar consideravelmente, sendo um fenômeno mais facilmente observado quando há um ilhamento e as condições do sistema indicam grande desbalanço entre a geração e a carga para a ilha.

Quando é observada uma variação significativa na frequência, controladores deverão atuar com o objetivo de restabelecer o equilíbrio entre a carga e a geração, removendo unidades geradoras ou cortando grandes blocos de carga se necessário.

Geralmente, os problemas relacionados à estabilidade de frequência estão associados a respostas inadequadas de equipamentos, reserva de geração insuficiente ou mesmo, quando há reserva suficiente, as máquinas podem não responder tão rapidamente quanto necessário.

2.1.3 Estabilidade de Tensão

Definição 4. A estabilidade de tensão (*voltage stability*) se refere à capacidade de um SEP de manter a tensão estável em todos os barramentos, mesmo após submetido a um distúrbio.

O problema de estabilidade de tensão diz respeito à capacidade de um sistema de manter a tensão nos diversos barramentos dentro de limites aceitáveis, durante a operação normal ou quando da ocorrência de uma pequena ou grande perturbação¹. Diz-se que o sistema é instável do ponto de vista de tensão quando há a queda ou elevação progressiva e descontrolada do perfil de tensão em pelo menos um ponto do sistema.

Como os fenômenos de instabilidade e colapso ocorrem devido à incapacidade do sistema de fornecer suporte de potência reativa necessária para manter um perfil razoável de tensão, o problema de estabilidade de tensão é de natureza local. Por outro lado, dependendo do número e da ordem de grandeza dos distúrbios, a instabilidade de tensão pode ocorrer em vários pontos de um subsistema. Como consequências possíveis desta instabilidade tem-se: o corte de carga de uma área e remoção de linhas de transmissão e outros elementos devido à atuação dos respectivos sistemas de proteção.

Um dos principais motivos para a existência de problemas de instabilidade de tensão é a demanda. Mesmo quando submetido a um contingenciamento, o SEP tende a restaurar o atendimento à carga, aumentando a tensão do barramento a que estas estão conectadas. O transformador com *tap* variável é um exemplo de equipamento que realiza a restauração da carga através do controle da tensão.

Quando o SEP é submetido a uma sequência de eventos que provocam uma instabilidade na tensão de pontos do sistema, é possível de haver um *blackout*. Este processo é comumente chamado de **colapso de tensão**.

Uma outra forma da instabilidade de tensão se manifestar é pelo fenômeno de auto-excitação, onde é observado um aumento rápido da tensão terminal da máquina. Isto decorre devido a existência de uma grande carga capacitiva alimentada pela máquina, que pode ser, por exemplo, uma linha de alta tensão desligada em um dos terminais.

Da mesma maneira que foi feito com a estabilidade angular, julga-se conveniente separar a estabilidade de tensão em duas classes de problemas: a estabilidade de tensão considerando pequenas perturbações e a estabilidade de tensão considerando grandes perturbações.

¹O critério utilizado aqui para definir se uma perturbação é pequena ou grande é análogo ao da estabilidade angular

Estabilidade a Pequenas Perturbações

A estabilidade a pequenas perturbações diz respeito à capacidade do sistema de manter suas tensões estáveis quando o sistema é sujeito a um distúrbio pequeno, como um pequeno aumento da carga.

Influenciam na estabilidade de tensão a pequenas perturbações as características da carga e a atuação de controles contínuos. Controles discretos (como *taps* de transformadores) podem ser ou não incluídos na análise.

Através da linearização do sistema permitida pela amplitude da perturbação, pode-se determinar outras características do sistema. Por exemplo, pode-se prever o quanto a tensão de um barramento deve cair à medida que a carga de outro sobe.

Estabilidade a Grandes Perturbações

A estabilidade a grandes perturbações diz respeito à capacidade do sistema de manter suas tensões estáveis quando o sistema é sujeito a um grande distúrbio, como um curto-circuito, perda de geração ou a contingência de algum circuito.

Ao contrário do caso de pequenas perturbações, controles discretos e proteções também influenciam na estabilidade.

A análise das grandes perturbações requer que o modelo matemático do sistema inclua as não-linearidades do fluxo de potência. A análise ao longo do tempo também é importante, principalmente quando se considera a coordenação de proteções e outros controles supervisórios.

2.2 Segurança de Sistemas de Potência

Em publicação na revista “IEEE Power & Energy Magazine”, Morrison, Wang e Kundur[5] definem a segurança de um sistema de potência:

Definição 5. A segurança se refere ao grau do risco da capacidade de um sistema de potência sobreviver a distúrbios iminentes sem interromper o fornecimento de energia ao consumidor. A segurança se relaciona com a robustez do sistema em relação a distúrbios iminentes e, portanto, depende das condições operativas do sistema bem como da probabilidade dos distúrbios.

(tradução livre)

Historicamente, conforme os sistemas foram crescendo, também cresceram as exigências quanto à qualidade da energia que era oferecida. Segundo a definição 5, a segurança consiste na avaliação do risco que um sistema tem ao estar sujeito a determinadas contingências, assim como o impacto negativo que tais eventos implicam.

Originalmente, as redes eram operadas por monopólios (usualmente entes estatais), em uma estrutura verticalizada. Eram, em tese, sistemas mais seguros, pois a empresa que controlava o sistema era capaz de planejá-lo em sua totalidade.

Contudo, tal arranjo foi constatado como insatisfatório em dado momento e introduziu-se nos sistemas de potência o conceito de mercados livres. Com essa abertura de mercado e aumento na competitividade, o número de incertezas aumentou, reduzindo a robustez do sistema. Os sistemas se tornaram, portanto, menos seguros.

Para garantir o correto funcionamento do sistema, conceitos acerca da segurança precisaram ser redefinidos e aprimorados, de maneira a garantir que os sistemas operem com uma probabilidade aceitável de operar satisfatoriamente ao longo do tempo. De fato, Morrison, Wang e Kundur[5] assim afirmam:

Avaliações mais rigorosas e novos requisitos são necessários em um novo ambiente competitivo.

(tradução livre)

Seguindo esta necessidade, definiu-se uma ferramenta conceitual que seria capaz de avaliar o grau de segurança de um sistema, dado um ponto de operação. Através dessa ferramenta conceitual, é possível avaliar as condições em que o sistema está operando, considerando as diferentes abordagens de estabilidade, bem como outros critérios de qualidade de operação. Morrison, Wang e Kundur[5] assim definem:

Definição 6. DSA² se refere à análise necessária para determinar se um sistema de potência consegue atingir o grau de confiabilidade e segurança especificados em ambas as análises de regime permanente e transitória, para todas as contingências plausíveis. No âmbito da operação, um sistema seguro é aquele no qual os critérios de operação são respeitados nas condições pré e pós-contingenciamento.

(tradução livre)

Tal ferramenta exige que as análises realizadas cubram um grande número de aspectos do sistema, como os critérios de segurança (e.g. limites térmicos das linhas e os limites de tensão dos barramentos) e as diferentes formas de estabilidade. A implementação, contudo, esbarra num problema de viabilidade computacional.

Historicamente, a avaliação da segurança de um sistema é realizada num contexto *offline*, num ambiente de planejamento da operação. Neste contexto, submete-se o sistema planejado a diferentes condições previsíveis, pelo uso de ferramentas de análises de regime permanente (como o fluxo de potência) e de análises transitórias (como a simulação no tempo de transitórios eletromecânicos).

²*Dynamic Security Assessment* ou Avaliação de Segurança Dinâmica

Neste novo ambiente competitivo descrito por Morrison, Wang e Kundur, tal avaliação não é mais suficiente devido ao número elevado de incertezas, comprometendo as previsões que podiam ser realizadas no planejamento. Surge, portanto, a necessidade de uma ferramenta que avalie a segurança do sistema de maneira mais célere: o contexto *online*. Neste contexto, diversas simulações são realizadas considerando o sistema no tempo real, com celeridade o suficiente para o operador reagir caso determinada contingência analisada se mostre como potencialmente insegura.

2.2.1 Estabilidade, Segurança e Confiabilidade

A definição 5 vai ao encontro da definição 1. Apresenta, contudo, um conceito complementar ao definido da estabilidade: diz respeito também ao risco associado às condições de estabilidade do sistema. Insere também o conceito de **condições operativas**, ou limites aceitáveis para grandezas físicas do sistema. A segurança difere da estabilidade, portanto, ao levar em consideração as condições físicas do sistema e não apenas as condições matemáticas encontradas nos modelos.

A definição 5, ainda, aproxima-se do conceito de confiabilidade descrito por Bazovsky[9]:

Definição 7. Confiabilidade é a probabilidade de um dispositivo realizar seu propósito de maneira adequada pelo período de tempo pretendido sob as condições operativas em que se encontra.

(tradução livre)

Se tratando de sistemas de potência, especificamente, tem-se o conceito de confiabilidade cunhado de maneira específica pelo NERC (*North American Electric Reliability Corporation*):

Definição 8. Confiabilidade, em um sistema elétrico de potência, é o grau para o qual a performance dos elementos deste sistema resultam na energia sendo entregue aos consumidores, dentro de padrões aceitáveis e na quantidade desejada. O grau de confiabilidade pode ser mensurado em termos de frequência, duração e magnitude dos efeitos adversos para o consumidor.

(tradução livre)

A confiabilidade do sistema é, portanto, uma extensão do conceito de segurança e o objetivo principal no planejamento e operação de um sistema de potência. Para ser confiável, o sistema precisa ser seguro na maior parte do tempo em que opera. E para ser seguro, o sistema precisa ser não apenas estável, mas também estar operando dentro de limites físicos considerados. Existe, portanto, uma forte correlação entre os conceitos de estabilidade, segurança e confiabilidade.

2.2.2 Ferramentas Utilizadas para a Avaliação de Segurança

Dentre os muitos recursos desenvolvidos para a análise de sistemas de potência, alguns podem ser destacados por envolverem diretamente o conceito de segurança de sistemas de potência. Existe um conceito inerente a cada ferramenta que diz respeito à análise do ponto de operação e sua vizinhança. Para algumas ferramentas, apenas é considerado o ponto de operação. Para outras, se faz uma varredura no entorno considerando alguns critérios.

Serão brevemente descritas as seguintes ferramentas (em função do mapeamento que realizam):

\mathbb{R}^0 : Análise de Sensibilidade e Análise de Contingência;

\mathbb{R}^1 : Fluxo de Potência Continuado;

\mathbb{R}^2 : Região de Segurança pelo Método dos Nomogramas;

\mathbb{R}^n : Métodos Baseados em Confiabilidade.

Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade consiste na avaliação de como determinada grandeza varia em função de outra, dado um ponto de operação e considerando a variação como sendo incremental. Pode-se, por exemplo, avaliar como a tensão de determinado barramento cresce ou decresce dado que um gerador específico aumente a sua geração[10].

A partir dessa ferramenta, é possível avaliar quais são os pontos do sistema que são mais *sensíveis* a mudanças na rede e, portanto, mais suscetíveis a apresentarem problemas de estabilidade e outras violações de segurança.

A cada ponto de operação distinto, uma nova relação entre as variáveis do sistema é obtida. Logo, a análise de sensibilidade é uma análise de segurança do tipo \mathbb{R}^0 , pois se refere ao ponto analisado.

Análise de Contingências

Durante as premissas para a definição dos conceitos de estabilidade e segurança, considerou-se que o sistema é susceptível a distúrbios ou perturbações e que, apesar de sua ocorrência, o sistema deveria ser capaz de continuar a operar de maneira estável. De maneira abrangente, a contingência é definida como sendo qualquer evento possível de ocorrer sobre o sistema e que é passível de ser testada.

A ferramenta clássica de análise de contingências busca encontrar a solução do fluxo de potência, dado um ponto de operação, para situações de pós-distúrbio[11]. Do ponto de vista da estabilidade, a existência de solução destes casos indica a

estabilidade do sistema frente a essas perturbações. Do ponto de vista da segurança, pode-se analisar se os valores das grandezas do sistema estão dentro de limites especificados[12].

A ferramenta de análise de contingências pode ser estendida para a análise dinâmica das contingências. Neste caso, analisa-se não apenas a condição de regime permanente encontrado pelo simulador, mas também o desempenho dinâmico de variáveis de interesse, ou ainda, a transição entre a condição pré e pós-contingência.

As contingências geralmente são definidas pelo usuário segundo algum critério previamente conhecido. Pode-se citar como exemplo o critério $N - 1$ para o caso estático: elenca-se uma série de linhas de transmissão para serem removidas, removendo-as uma por vez (retornando sempre ao caso base). Para o caso dinâmico, as contingências costumam ser definidas como um conjunto de eventos consistindo de um curto-circuito em linha (em geral monofásico) e posterior remoção da linha em curto-circuito, representando o tempo de atuação da proteção. Outras alterações na rede podem ser incluídas dentro dessa lista de contingências (para ambos os casos estático e dinâmico), como por exemplo a perda de uma unidade geradora de uma usina.

Pode-se definir a análise de contingências como uma análise de segurança do tipo \mathbb{R}^0 uma vez que a avaliação do sistema no pós-distúrbio é referente a um ponto base, sendo, portanto particular de cada ponto.

Fluxo de Potência Continuado

As abordagens das ferramentas anteriores dizem respeito à características do ponto de operação que são dependentes apenas do próprio ponto. Uma outra classe de ferramentas considera não apenas o ponto, mas também uma certa vizinhança de possibilidades. Para o caso do fluxo de potência continuado em particular, é de interesse encontrar o máximo carregamento que um sistema pode assumir, através de sucessivos incrementos no valor da carga. Ou seja, qual é a *margem de carregamento* em relação ao ponto base[13].

Para cada incremento de carga, há um novo ponto de operação encontrado. O objetivo está em encontrar o último ponto viável deste sistema, seguindo a regra de crescimento previamente definida. Note que a cada incremento, ferramentas de segurança do tipo \mathbb{R}^0 podem ser aplicadas em cada ponto encontrado pela ferramenta (constituindo uma das propostas deste trabalho).

É uma ferramenta de análise de segurança do tipo \mathbb{R}^1 , pois avalia-se o crescimento de carga para dada direção *particular* de crescimento, ou seja, a varredura no universo de possibilidades está confinada a uma reta específica, definida previamente através de fatores de crescimento (que podem considerar, por exemplo, critérios operativos adotados). Este tipo de análise será melhor abordado no capítulo 4.

Método dos Nomogramas

No fluxo de potência continuado, avalia-se a segurança de um sistema considerando o crescimento de carga. Isto é, avalia-se condições futuras possíveis em que se prevê o crescimento da carga, como acontece no ciclo diário. Contudo, não se tem a informação se o ponto de operação no instante atual é adequado, ou se existe um ponto que seja mais adequado.

O método dos nomogramas apresenta, de uma maneira visual, a informação de segurança acerca de um ponto de operação, considerando-se uma vizinhança contida em um plano (\mathbb{R}^2). Existem algumas maneiras de se realizar esta varredura; pode-se, por exemplo, avaliar de diferentes combinações das gerações de usinas de interesse para uma carga constante. Para isto, definem-se três grupos geradores, que estão sujeitos à seguinte restrição:

$$P_{G1} + P_{G2} + P_{G3} = k \quad (2.1)$$

Sendo P_{G_i} a potência gerada pelo i -ésimo grupo gerador e k uma constante. A definição do grupo gerador abrange quaisquer conjunto de máquinas que o usuário assim defina. Pode ser, por exemplo, as máquinas que pertencem a uma determinada região geográfica.

A partir de um ponto inicial, chamado de caso base, varia-se os valores de dois desses grupos livremente (P_{G1} e P_{G2} , por exemplo), segundo qualquer regra de varredura de malha. O valor do despacho do terceiro grupo é feito de maneira a complementar a geração dos outros dois grupos. No programa Anarede, por exemplo, esta varredura é feita considerando uma exploração polar a partir do caso base[14]. Outras abordagens a este mapeamento já foram sugeridas[15].

Em cada ponto da região analisada, realiza-se as análises de segurança do tipo \mathbb{R}^0 desejadas (usualmente análise de contingências e a verificação de condições operativas). Ao final, define-se um delimitador para cada variável de segurança considerada, criando regiões responsáveis por informar que todos os pontos contidos por elas não apresentam problemas de segurança para determinado critério. A fig. 2.2 apresenta um exemplo ilustrativo do que seria um nomograma com essas informações de segurança.

Todos os pontos mapeados e que estejam contidos na região azul, por exemplo, não apresentam violações nos valores de tensão. Em alguns pontos, há violação de tensão, mas não de carregamento. Em outros, viola-se esses dois critérios. Para o nomograma com informação de amortecimento, as regiões definem que os pontos contidos terão como menor valor de amortecimento o indicado pela legenda. As regiões apresentadas em nomogramas como os da fig. 2.2 são arbitrárias no sentido que os mais diversos critérios de segurança podem ser considerados.

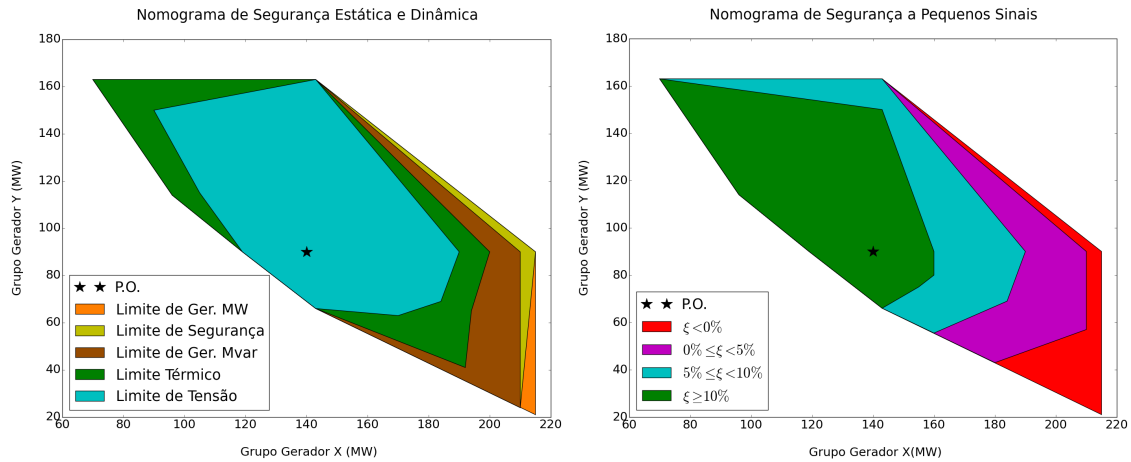


Figura 2.2: Nomogramas genéricos para o DSA

Métodos Baseados em Confiabilidade

Todas as ferramentas apresentadas baseiam-se no conceito de que é preciso avaliar situações *possíveis* em que o sistema pode estar operando. Para a análise de contingências, elenca-se os eventos possíveis e submete-se o sistema a estes, de maneira individual. Para o fluxo de potência continuado, o objetivo é avaliar o possível crescimento de carga que (para o contexto da operação no tempo real) pode vir a ocorrer nas próximas horas ou minutos. Para o método dos nomogramas, quer-se avaliar uma outra configuração de despacho das máquinas que apresente margens do ponto de operação aos limites das regiões ampliados.

Os métodos baseados em confiabilidade consideram não apenas o que é possível de acontecer, mas principalmente o quão *provável* o evento é[16]. Para a análise de contingências, por exemplo, não é necessário elencar as possibilidades. Em geral, informa-se as taxas de falha dos equipamentos (como unidades geradoras e linhas de transmissão) e, com essa informação, pode-se avaliar de maneira mais realista os eventos possíveis, fazendo uso de um algoritmo de Simulação Monte Carlo[17]. Quando se leva em consideração a probabilidade dos eventos, a análise de segurança não indica apenas se existe alguma violação em uma grandeza monitorada, mas também a *probabilidade* desta violação. Naturalmente, para uma correta avaliação probabilística do sistema, é requerido que a informação de falha dos equipamentos seja conhecida de forma precisa; o que, em geral, não é verdade.

Outra aplicação dos conceitos de confiabilidade está na avaliação do crescimento de carga. O fluxo de potência continuado aplica o crescimento considerando uma direção fixa. Sabendo-se as funções de probabilidade das cargas de cada barramento, pode-se prever crescimentos e decrescimentos de carga analisando todo o espaço de possibilidades, mas orientado às combinações mais prováveis. Dentro deste conceito, a análise de segurança realizada é do tipo \mathbb{R}^n .

2.3 Região de Segurança pelo Método dos Nomogramas nos Programas Anarede e Anatem

O programa Anarede apresenta muitas das ferramentas de segurança apresentadas. O uso da análise de contingência, da análise de sensibilidade e do fluxo de potência continuado já é comum no dia a dia dos analistas. O método dos nomogramas, por outro lado, é considerado um desenvolvimento relativamente recente e pode não ser de amplo conhecimento. Como este trabalho se baseia nos conceitos de segurança definidos por este método, é oportuno revisitar algumas definições.

Definição 9. VSA (acrônimo para *Voltage Security Assessment*) é a ferramenta de análise de segurança **estática**, realizada pelo programa Anarede, também referida como RSE (*Região de Segurança Estática*).

Definição 10. DSA (acrônimo para *Dynamic Security Assessment*) é a etapa da ferramenta VSA que diz respeito à análise de segurança **dinâmica**, realizada pelo programa Anatem.

Estas definições são importantes uma vez que diferem um pouco do conceito estabelecido por Kundur et al.[4]. Ainda, é possível definir:

Definição 11. SSA (acrônimo para *Small-signal Security Assessment*) é a ferramenta de análise de segurança *a pequenos sinais*, realizada pelo PacDyn. Esta ferramenta avalia apenas o pior amortecimento dentre todos os modos encontrados ou monitorados.

Na ferramenta VSA/DSA, é possível de se avaliar os seguintes critérios de segurança:

- Violação de tensão;
- Violação de carregamento de circuitos;
- Violação de geração de potência reativa (para máquinas síncronas);
- Existência de solução do ponto.

Para cada ponto mapeado, avalia-se o sistema íntegro e em contingência, considerando cada um dos critérios. Ao final são gerados três nomogramas referente às projeções do plano avaliado. A fig. 2.3 apresenta o nomograma para a segurança estática gerado para o caso exemplo que acompanha a instalação do programa.

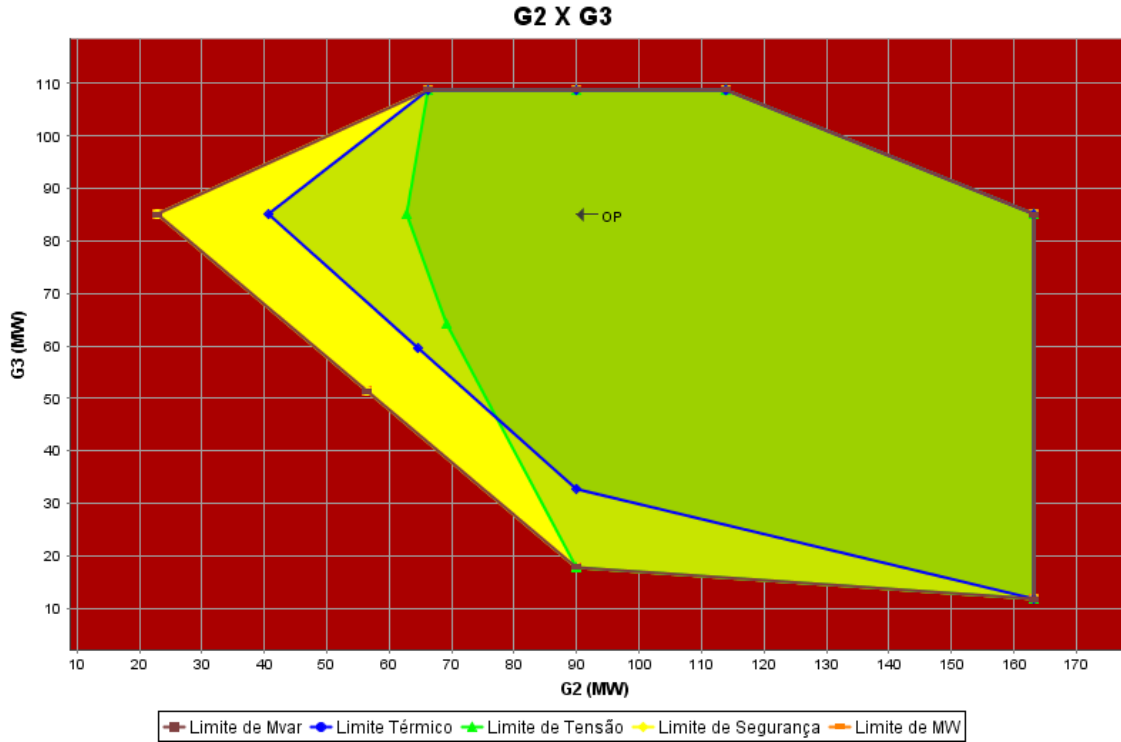


Figura 2.3: Nomograma da RSE para o grupo $G_2 \times G_3$

As regiões para cada critério de segurança são definidas por polígonos cujos vértices representam **o primeiro ponto em que é constatada a violação**, com a exceção dos vértices que delimitam a região como um todo. Neste caso, o vértice representa o último ponto viável. A informação visual do nomograma possui duas componentes: os limites (que formam polígonos) definidos pelas suas arestas e vértices; e o fundo de cada região. A definição destes limites, conforme apresentado pelo Anarede, segue:

Definição 12. Limite de Tensão delimita uma região no nomograma onde é garantido que em seu interior todos os pontos obedecem às restrições de tensão. Isto é, todos os barramentos monitorados apresentam o valor de tensão dentro dos limites especificados, considerando o caso base e as contingências.

Definição 13. Limite Térmico (também conhecido como Limite de Carregamento ou Limite de Fluxo) delimita uma região no nomograma onde é garantido que em seu interior todos os pontos obedecem às restrições de carregamento. Isto é, todos os circuitos (linhas e transformadores) monitorados apresentam o valor de carregamento dentro dos limites especificados, considerando o caso base e as contingências.

Definição 14. Limite de Mvar (também conhecido como Limite de Geração de Potência Reativa) delimita uma região no nomograma onde é garantido que em seu interior todos os pontos obedecem às restrições de geração de potência reativa.

Isto é, todas as barras PVs monitoradas apresentam o valor da geração de potência reativa dentro dos limites especificados, considerando o caso base e as contingências.

Definição 15. Limite de Segurança delimita uma região no nomograma onde é garantido que em seu interior todos os pontos apresentam solução para o caso base e para todas as contingências consideradas. Isto é, não existe uma contingência que apresente um problema de não-convergência ou divergência.

Definição 16. Limite de MW delimita a região mais externa do nomograma. Nesta região, é garantido que o caso base apresenta solução. Os vértices desta região são definidos por um de três motivos: número de iterações na direção excedido (constante ICIT); limite de geração de potência ativa atingido para todas as máquinas do grupo; não-convergência do sistema íntegro.

A cor de fundo das regiões serão sempre uma dentre cinco possibilidades:

- Fundo Vermelho:** O ponto base não apresenta solução ou não foi avaliado;
- Fundo Laranja:** O ponto base apresenta solução, mas existe alguma contingência para qual não se encontrou solução;
- Fundo Amarelo:** Todas as contingências apresentaram solução, mas foi verificada a violação de tensão e de carregamento para os casos considerado;
- Fundo Verde-claro:** Considerando o sistema íntegro e as contingências, para o ponto verificou-se que há apenas violação de tensão ou apenas de carregamento;
- Fundo Verde-escuro:** Considerando o sistema íntegro e as contingências, para o ponto verificou-se que não existem violações de tensão e de carregamento

Observe que o limite de Mvar não possui influência sobre a cor de fundo. Para a etapa DSA da ferramenta, os mesmos limites são avaliados pelo Anatem, para as contingências dinâmicas informadas. Existem algumas diferenças, contudo. Para o limite de tensão, por exemplo, considera-se também o desempenho dinâmico dos sinais de tensão (e.g. amplitude máxima de 2 pontos percentuais, ou *2pp*, permitida para após 10 segundos de análise). Também são considerados os limites dinâmicos, segundo critérios preestabelecidos, como os recomendados pelo ONS[2]. O nomograma determinado pela etapa DSA é análogo ao da fig. 2.3.

Capítulo 3

Método dos Nomogramas para Avaliação de Amortecimento do Sistema

Neste capítulo serão abordados diferentes métodos para a determinação do amortecimento do sistema e implementação dessa formulação matemática para uma ferramenta capaz de gerar nomogramas com a informação do amortecimento calculado. Para isso, serão mostrados e comparados os métodos de Prony, ERA e um método simplificado baseado nos picos dos sinais.

3.1 Proposta

No âmbito da determinação das Regiões de Segurança Estática e Dinâmica pela ferramenta VSA/DSA em que o Anatem se insere, múltiplas simulações no tempo de contingências programadas em diversas configurações de despacho são realizadas. Essas simulações requerem uso intensivo de computação para serem realizadas, dentro de um contexto *online* ou *offline*. Embora o uso da ferramenta para cada um desses contextos exija certos requisitos computacionais, tem-se de qualquer maneira uma exigência grande de processamento. No caso da simulação *online*, espera-se que a janela de atualização da ferramenta seja entre 5 e 10 minutos[18].

Existem algumas alternativas para abordar esse problema envolvendo simplificações nos modelos e rede. Contudo, tais aproximações desprezam não-linearidades e dinâmicas complexas dos modelos, sendo portanto modelos pouco confiáveis. Como o problema pode ser entendido por um conjunto de simulações independentes, uma alternativa para resolver o problema de desempenho computacional seria através da computação distribuída[5, 19].

O programa PacDyn, desenvolvido pelo Cepel, tem por finalidade a análise de

pequenos sinais dos grandes sistemas de potência. Em uma de suas ferramentas, é possível determinar os modos do sistema e o quão amortecidos esses modos são. Em implementação recente[3], combinou-se esse recurso com o mapeamento realizado pelo Anarede no VSA/DSA, gerando nomogramas de amortecimento.

Este novo recurso permite que sejam avaliadas as condições de amortecimento do ponto de operação e de sua vizinhança, com o sistema íntegro ou sob contingência, de acordo com um critério de redespacho entre grupos geradores definido pelo usuário. É permitido ao usuário, para o cálculo desses modos e seus amortecimentos, optar entre o uso do método QR[20, 21] e o método DPSE (*Dominant Pole Spectrum Eigensolver*)[22]. A diferença prática entre ambos reside na abrangência do método para encontrar os modos e no desempenho computacional: sendo a QR um método que encontra todos os modos, mas com elevado custo computacional e o DPSE um método que encontra modos dominantes, baseados em uma estimativa inicial, mas com custo computacional reduzido.

Apesar da ferramenta VSA/DSA, desenvolvida pelo Cepel através do Anarede e Anatem, já contemplar a computação distribuída[2, 23], não é possível com o PacDyn se aproveitar da mesma estrutura¹. Desta forma, embora seja possível gerar nomogramas de amortecimento com grau de confiabilidade alto, ainda não existe a possibilidade de fazê-lo de maneira célere.

A análise de pequenos sinais é feita de maneira analítica pelo PacDyn, a partir do cálculo de autovalores da matriz que representa a linearização dos modelos das máquinas em torno do ponto de operação do caso. Contudo, é possível, a partir da observação das oscilações do sistema não-linear, *estimar* os modos aproximados[24, 25].

Tendo as simulações no domínio do tempo sido realizadas pelo Anatem dentro do contexto DSA, será possível estimar os modos eletromecânicos e seus amortecimentos, gerando um mapeamento do amortecimento de acordo com os nomogramas gerados. Naturalmente, tal abordagem permite a herança do ganho da computação distribuída presente na ferramenta de VSA/DSA, com um custo no tempo de simulação individual referente a análise dessas oscilações.

3.2 Métodos para a Estimação do Amortecimento

Existem muitos métodos na literatura que versam sobre a estimação modal de sinais, onde características inerentes dos sistemas a serem modelados definiram qual o melhor método para o caso.

Para este trabalho, quer-se modelar de maneira linear um sistema que é sabido

¹Enquanto os programas Anarede e Anatem se baseiam em uma plataforma Unix para computação distribuída, o PacDyn está baseado em plataforma Windows

ser não-linear, com o objetivo de se estimar o amortecimento do sistema. Neste trabalho, define-se como **amortecimento** o amortecimento (linear) encontrado a partir da linearização do sistema analisado.

O amortecimento estimado será determinado a partir do conhecimento dos *modos* do sistema. Neste texto, define-se como **modos reais** ou **modos de fato** os modos encontrados que são significativos para a dinâmica do sistema; em contraposição aos **modos matemáticos** ou **modos numéricos** aqueles modos encontrados pelos algoritmos e que representam a dinâmica de um ruído ou encontrados em decorrência do algoritmo, mas que não carregam significado para o sistema em si.

Para estimar os modos, considerou-se dois métodos clássicos (Método de Prony e o Método ERA) e um método simplificado (Picos-Sucessivos). De maneira simplificada, esses métodos são utilizados em um algoritmo que busca encontrar o parâmetro de amortecimento ξ definido pela seguinte equação:

$$\xi = -\frac{\text{Re}(\lambda)}{|\lambda|} \quad (3.1)$$

Sendo λ um modo do sistema.

Estimação do Mínimo Amortecimento do Sistema

Dentro do conceito de Região de Segurança, uma ferramenta capaz de analisar o sistema mediante à análise linear pode ter muitas vertentes, tais como: a análise de autovalores; computação de modos específicos de oscilação; computação de modos de determinado gerador; análise de sensibilidade; monitoração em tempo real do sistema[3, 26].

Para o método em questão, é proposta a sua utilização para determinar o amortecimento observado para cada gerador de interesse do sistema. Existem algumas opções quanto à origem do sinal a ser usado para a estimação das oscilações, tais como a frequência da máquina ou a tensão da barra terminal. Num contexto de simulação (em contraponto com medição *in loco*), os sinais são livres de ruído de medição e apresentam apenas ruídos dos modos introduzidos pelo método numérico de simulação, que são em amplitude muito inferiores aos produzidos por medidores.

Desta maneira, muitas outras variáveis poderiam ser utilizadas para a observação dessas oscilações, como tensões em eixo de quadratura ou correntes de armadura ou campo; sinais que poderiam sequer ser observáveis no mundo físico. Para a estimação do amortecimento do sistema, será considerado o *menor* amortecimento encontrado na observação dos sinais de frequência das máquinas monitoradas; mais especificamente, no sinal de *desvio de frequência*, o mesmo sinal comumente utilizado nos estabilizadores de sistema de potência (PSS, *Power System Stabilizer*).

Assim:

$$\xi_{\text{sistema}} = \min_{i=1}^n (\xi_{\text{dwmaq}}^i) \quad (3.2)$$

Sendo ξ_{dwmaq}^i o amortecimento encontrado para a i -ésima máquina monitorada.

3.2.1 Método dos Picos-Sucessivos

Uma maneira intuitiva de se determinar o amortecimento de um sinal oscilatório seria através da determinação de uma exponencial aproximadamente envoltória a esse sinal. Combinando o parâmetro de decaimento da exponencial com a frequência de oscilação observada, pode-se inferir qual seria o amortecimento do sinal amostrado.

Em relação à eq. (3.1), λ é o parâmetro que define a exponencial complexa que melhor representaria o sinal. A parte real de λ define a exponencial envoltória e a parte imaginária define a frequência de oscilação observada.

Estimação da Envoltória pelo Método dos Mínimos Quadrados

O Método dos Picos-Sucessivos consiste na análise dos máximos locais (*maxima*) do sinal no domínio do tempo e na tentativa de encontrar uma exponencial que se aproxime desses máximos.

Seja X o domínio da função e Y a sua imagem. Define-se:

$$\text{maxima}(X, Y) = \left\{ (x^*, f(x^*)) \in (X, Y) \mid f(x^*) \geq f(x^* \pm \varepsilon) \right\} \quad (3.3)$$

para qualquer $\varepsilon > 0$ suficientemente pequeno.

No caso de um sinal amostrado no tempo, a função torna-se discreta e monovariável. Denomina-se x_k elemento do Domínio X e $f(x_k)$ o elemento correspondente de sua Imagem Y . Seja também X um Domínio finito que contém n elementos. Define-se o *maxima*:

$$\text{maxima}(X, Y) = \left\{ (x_k, f(x_k)) \in (X, Y) \mid f(x_k) \geq f(x_{k\pm 1}), \forall k = 2, 3 \dots n - 1 \right\} \quad (3.4)$$

Havendo determinado o conjunto de pontos do *maxima*, quer-se encontrar os parâmetros α e β da seguinte equação:

$$y_k = \alpha e^{\beta x_k} \quad (3.5)$$

Para um número de pontos superior a 2, pode não existir um valor para α e β que satisfaça todos os pares (x_k, y_k) obtidos pelo *maxima*. Desta maneira, uma abordagem intuitiva para a determinação desses parâmetros seria através do Método dos Mínimos Quadrados[27]. Aplicando a função $\ln(\cdot)$ em ambos os lados da eq. (3.5)

e assumindo um erro ε na equação linear, tem-se :

$$\ln y_k = \ln \alpha + \beta x_k + \varepsilon_k \quad (3.6)$$

$$S = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (\ln(y_i) - \ln(\alpha) - \beta x_i)^2 \quad (3.7)$$

Faz-se a seguinte mudança de variáveis:

$$a = \ln \alpha, \quad b = \beta, \quad z_i = \ln y_i$$

A função S terá um ponto crítico em (a^*, b^*) e esse ponto será um mínimo local se e somente se:

$$\nabla S(a^*, b^*) = \bar{0} \quad (3.8)$$

$$\det(H(S(a^*, b^*))) = S_{aa}S_{bb} - (S_{ab}^2) > 0 \quad (3.9)$$

Sendo:

$$S_{aa} = \frac{\partial^2 S}{\partial a^2}(a^*, b^*), \quad S_{bb} = \frac{\partial^2 S}{\partial b^2}(a^*, b^*), \quad S_{ab} = \frac{\partial}{\partial a} \left(\frac{\partial S}{\partial b} \right) (a^*, b^*) = \frac{\partial}{\partial b} \left(\frac{\partial S}{\partial a} \right) (a^*, b^*)$$

e $H(S)$ a matriz Hessiana de S . Resolvendo a eq. (3.8):

$$\frac{\partial S}{\partial a}(a^*, b^*) = \sum_{i=1}^n -2(z_i - a^* - b^* x_i) = 0 \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial S}{\partial b}(a^*, b^*) = \sum_{i=1}^n -2x_i(z_i - a^* - b^* x_i) = 0 \quad (3.11)$$

$$\begin{cases} na^* + \sum_{i=1}^n x_i b^* = \sum_{i=1}^n z_i \\ \sum_{i=1}^n x_i a^* + \sum_{i=1}^n x_i^2 b^* = \sum_{i=1}^n x_i z_i \end{cases} \quad (3.12)$$

Por uma questão de simplificação na notação, adota-se:

$$\sigma_{x^2} = \sum_{i=1}^n x_i^2, \quad \sigma_x = \sum_{i=1}^n x_i, \quad \sigma_{xz} = \sum_{i=1}^n x_i z_i, \quad \sigma_z = \sum_{i=1}^n z_i$$

Os pontos críticos (a^*, b^*) de $S(a, b)$, se existirem, serão um único e serão a

solução do sistema linear encontrado em (3.12). A solução do sistema segue:

$$\begin{cases} a^* = \frac{\sigma_{x^2}\sigma_z - \sigma_x\sigma_{xz}}{n\sigma_{x^2} - (\sigma_x)^2} \\ b^* = \frac{n\sigma_{xz} - \sigma_x\sigma_z}{n\sigma_{x^2} - (\sigma_x)^2} \end{cases} \quad (3.13)$$

Existirá um ponto crítico (a^*, b^*) desde que:

$$n\sigma_{x^2} \neq (\sigma_x)^2 \quad (3.14)$$

De fato, esta inequação será sempre verdadeira a menos de uma situação específica. Esta condição será observada novamente a seguir na verificação da inequação de otimalidade (3.9):

$$S_{aa} = \sum_{i=1}^n 2 = 2n \quad (3.15)$$

$$S_{bb} = \sum_{i=1}^n 2x_i^2 = 2\sigma_{x^2} \quad (3.16)$$

$$S_{ab} = \sum_{i=1}^n 2x_i = 2\sigma_x \quad (3.17)$$

$$\det(H(S)) = 4n\sigma_{x^2} - 4(\sigma_x)^2 \quad (3.18)$$

Podemos reescrever σ_x e σ_{x^2} na notação de norma de vetor:

$$\sigma_{x^2} = |x|_2^2, \quad \sigma_x = |x|_1$$

Segundo a desigualdade de Cauchy-Schwartz, $|\bar{v} \cdot \bar{w}| \leq \|\bar{v}\| \cdot \|\bar{w}\|$, tem-se:

$$|x|_1 = \sum_{i=1}^n x_i \cdot 1 \leq \left(\sum_{i=1}^n |x_i|^2 \right)^{1/2} \left(\sum_{i=1}^n 1^2 \right)^{1/2} = \sqrt{n}|x|_2 \quad (3.19)$$

Como $\bar{x} \neq \bar{1}$, isto é, os valores x_i são diferentes entre si, \bar{x} e $\bar{1}$ não são paralelos e por isso a desigualdade de Cauchy-Schwartz se torna estrita. Desta maneira:

$$\det(H) = 4n\sigma_{x^2} - 4(\sigma_x)^2 = 4n|x|_2^2 - 4|x|_1^2 > 0 \quad (3.20)$$

Como consequência da desigualdade de Cauchy-Schwartz ser estrita, a desigualdade (3.14) é verdadeira sempre. Desta forma, o ponto (a^*, b^*) existe, é único e é o mínimo global de S desde que o vetor de amostragem \bar{x} não seja paralelo ao vetor $\bar{1}$.

Estimação da Envoltória pelo Método dos Mínimos Quadrados Ponderados

Devido à natureza da função logarítmica, alguns valores de $\ln y_k$ poderão ser, em ordem de grandeza, muito superiores a outros quanto menor for o valor original de y_k . Desta maneira, é sugerido[28] mudar a função S a ser minimizada da eq. (3.7) para:

$$S = \sum_{i=1}^n y_i \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n y_i (\ln(y_i) - \ln(\alpha) - \beta x_i)^2 \quad (3.21)$$

Fazendo uso da mesma substituição de variáveis usada anteriormente, as eqs. (3.10) a (3.12) são reescritas como:

$$\frac{\partial S}{\partial a}(a^*, b^*) = \sum_{i=1}^n -2y_i (z_i - a^* - b^* x_i) = 0 \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial S}{\partial b}(a^*, b^*) = \sum_{i=1}^n -2x_i y_i (z_i - a^* - b^* x_i) = 0 \quad (3.23)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n y_i a^* + \sum_{i=1}^n y_i x_i b^* = \sum_{i=1}^n y_i z_i \\ \sum_{i=1}^n y_i x_i a^* + \sum_{i=1}^n y_i x_i^2 b^* = \sum_{i=1}^n y_i x_i z_i \end{cases} \quad (3.24)$$

Utilizando a mesma notação do caso anterior para simplificar o somatório, temos que o ponto crítico (a^*, b^*) pode ser calculado a partir das seguintes expressões:

$$\begin{cases} a^* = \frac{\sigma_{x^2y}\sigma_{yz} - \sigma_{xy}\sigma_{xyz}}{\sigma_y\sigma_{x^2y} - (\sigma_{xy})^2} \\ b^* = \frac{\sigma_y\sigma_{xyz} - \sigma_{xy}\sigma_{yz}}{\sigma_y\sigma_{x^2y} - (\sigma_{xy})^2} \end{cases} \quad (3.25)$$

A prova da otimalidade é análoga a realizada nas eqs. (3.15) a (3.20).

Estimação da Frequência

Havendo os parâmetros da exponencial envoltória sido determinados por qualquer um dos métodos anteriormente mencionados, resta definir a frequência de oscilação que melhor define o sinal.

Uma abordagem tradicionalmente utilizada para este fim está na análise da Transformada de Fourier do sinal, onde um sinal pode ser visto como uma decomposição de funções senoidais. O termo “Transformada de Fourier” engloba uma classe de transformações cujas funções de mapeamento são categorizadas de acordo

com a natureza do sinal a ser transformado e a resposta desejada (se tratando de sinais a tempo discreto e contínuo). Em particular, pode-se utilizar algum algoritmo de FFT (*Fast Fourier Transform*), que é um método computacional para calcular a DFT (*Discrete Fourier Transform*), para se encontrar as amplitudes das frequências que descrevem o sinal. Naturalmente, as frequências com maior amplitude seriam aquelas que representariam melhor o sinal analisado.

Contudo, propôs-se uma abordagem mais simples, baseado nos pontos de máximos encontrados pelos métodos anteriores. Define-se:

$$T_k = x_{k+1} - x_k \quad (3.26)$$

T_k representa, portanto, o período de dois máximos consecutivos. Para um conjunto de máximos com n elementos, o período médio é definido por:

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} T_i}{n-1} \quad (3.27)$$

E a frequência média é definida por:

$$\bar{f} = \frac{2\pi}{\bar{T}} \quad (3.28)$$

Estimação do Amortecimento de Sinal

Havendo se encontrado os parâmetros da exponencial envoltória (α e β) e a frequência média (\bar{f}), tem-se, em relação à eq. (3.1):

$$\text{Re}(\lambda) = \beta \quad (3.29)$$

$$\text{Im}(\lambda) = \bar{f} \quad (3.30)$$

Portanto:

$$\xi = -\frac{\beta}{\sqrt{\beta^2 + \bar{f}^2}} \quad (3.31)$$

3.2.2 Método de Prony

O Método de Prony (também conhecido como Análise de Prony), descrito inicialmente pelo matemático Francês do século XVIII Gaspard de Prony[29], é um método capaz de extrair informações de sinais uniformemente amostrados, ao decompor determinado sinal em uma série de exponenciais complexas (ou senoidais amortecidos).

O método descrito a seguir é a versão básica do Método de Prony (também conhecida como Método Original)[30], onde espera-se que o sinal a ser analisado

seja livre de ruídos. Versões mais robustas do método existem, como por exemplo o Método de Prony baseado nos Mínimos Quadrados[31], cujos algoritmos conseguem tratar diferentes características que os sinais podem vir a possuir, como ruído de amostragem ou medição.

Método de Prony Original

Seja $y(t_k)$ o registro contendo n pontos uniformemente amostrado por Δt de um sinal contínuo no tempo $y(t)$, $y(t_k)$ pode então ser simplificado para $y(k)$ com $k = 0, 1, 2 \dots n - 1$. O objetivo do Método de Prony será encontrar os parâmetros de um sistema do tipo:

$$\dot{x} = Ax \quad (3.32)$$

com condições iniciais não-nulas $x(t_0) = x_0$ tais que a solução:

$$\hat{y}(t) = Cx(t) \quad (3.33)$$

seja próxima do sinal observado $y(t)$ ou, para fins de computação numérica, de seu registro $y(k)$.

O Método de Prony pode ser resumido em três passos:

Passo 1: construção de um modelo de predição linear discreto (LPM, *Linear Prediction Model*) que se adeque ao registro $y(k)$

Passo 2: encontrar as raízes do polinômio característico associado ao modelo de predição linear do passo 1

Passo 3: determinar as amplitudes e fases iniciais dos modos, usando as raízes encontradas no passo 2

O sistema modelado pelas eqs. (3.32) e (3.33), para autovalores da matriz A independentes, pode ter a resposta $y(t)$ reescrita da seguinte forma:

$$\hat{y}(t) = \sum_{i=1}^p A_i \exp(\lambda_i t) \quad (3.34)$$

Sendo $A_i \in \mathbb{C}$ e $\lambda_i \in \mathbb{C}$. Para tempos discretizados:

$$\begin{cases} \hat{y}(k) = \sum_{i=1}^p A_i z_i^k \\ z_i = \exp(\lambda_i \Delta t) \end{cases} \quad (3.35)$$

Deseja-se encontrar os parâmetros A_i e z_i de maneira que $\hat{y}(k) = y(k)$, para todo k . Note que o parâmetro z_i está vinculado ao passo 2 do algoritmo enquanto

que o parâmetro A_i está vinculado ao passo 3. Assumindo que $\hat{y}(k) = y(k)$:

$$\begin{bmatrix} z_1^0 & z_2^0 & \cdots & z_p^0 \\ z_1^1 & z_2^1 & \cdots & z_p^1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{n-1} & z_2^{n-1} & \cdots & z_p^{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(n-1) \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Ou, de maneira compacta:

$$ZA = Y \quad (3.37)$$

Sendo a matriz Z uma matriz de Vandermonde[32], os valores de z_i serão as raízes de um polinômio de ordem p com coeficientes desconhecidos c_i , e portanto satisfazem:

$$z^p - (c_1 z^{p-1} + c_2 z^{p-2} + c_3 z^{p-3} + \dots + c_p z^0) = 0 \quad (3.38)$$

Constrói-se o vetor linha de coeficientes C , de dimensão $(1 \times n)$, a partir da equação anterior:

$$C = \begin{bmatrix} -c_p & -c_{p-1} & \cdots & -c_1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\underline{c} & 1 & \underline{0} \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

Aplicando o vetor C à eq. (3.37):

$$CY = CZA \quad (3.40)$$

$$CY = y(p) - \begin{bmatrix} c_1 y(p-1) + \dots + c_p y(0) \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Estendendo a eq. (3.38) para todos os valores z_i :

$$CZ = \underline{0} \quad (3.42)$$

Logo, a eq. (3.41) pode ser reescrita como:

$$y(p) = \begin{bmatrix} c_1 y(p-1) + \dots + c_p y(0) \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

Como a escolha do ponto inicial é arbitrária e as deduções realizadas não dependem intrinsecamente do índice usado, a eq. (3.43) pode ser modificada deslocando-se o índice de tal maneira a produzir o seguinte sistema linear:

$$\begin{bmatrix} y(p-1) & y(p-2) & \dots & y(0) \\ y(p-0) & y(p-1) & \dots & y(1) \\ y(p+1) & y(p-0) & \dots & y(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(n-2) & y(n-3) & \dots & y(n-p-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ \vdots \\ c_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(p+0) \\ y(p+1) \\ y(p+2) \\ \vdots \\ y(n-1) \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

A solução da eq. (3.44) fornece os coeficientes do polinômio no domínio z da eq. (3.38). Pode-se transformar as raízes z_i em autovalores λ_i (domínio s) através da eq. (3.35). Este procedimento compreende a solução dos passos 1 e 2 do método. O passo 3 é completado ao se solucionar o sistema da eq. (3.36).

Existem algumas considerações a serem feitas, quanto ao método básico:

- Para adequação perfeita, o sistema deve ser linear, o que nem sempre é verdade e é especialmente falso em sistemas de potência;
- A dimensão do sistema p não é conhecida previamente ou então é muito grande, obrigando que o algoritmo faça um modelo reduzido do sistema;
- Num caso de um sistema ruidoso, o algoritmo tenderá a reproduzir esses ruídos, a menos que seja feito algum tratamento ou modificação (não tratar o ruído implica em manter a ordem do sistema excessivamente alta);
- A matriz Z não é necessariamente quadrada. Desta maneira, pode-se empregar ferramentas como Mínimos Quadrados ou pseudo-inversas para a solução dos sistemas lineares;
- Muitas técnicas como a análise de valores singulares podem ser empregadas para a melhoria do algoritmo (para encontrar um valor de p menor, por exemplo).

Com todas essas manipulações, o sinal reconstruído $\hat{y}(t)$ não deverá reproduzir $y(t)$ de maneira exata, assim, recomenda-se a criação de parâmetros de fidedignidade para verificar o quão próximo o sinal reconstituído está do sinal original, como por exemplo a relação sinal-ruído (SNR)[30]:

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 20 \log \left(\frac{\|y - \hat{y}\|}{\|y\|} \right) \quad (3.45)$$

3.2.3 Eigensystem Realization Algorithm (ERA)

Para muitas finalidades, é desejado obter um modelo de um sistema a partir de dados experimentais coletados. Isto pode decorrer de algumas situações tais como: dificul-

dade ou complexidade da modelagem analítica do sistema; e ausência de parâmetros das equações que modelam os componentes dos sistema.

Dentro da Teoria Geral de Sistemas, define-se como realização de um modelo de espaço de estados a implementação cujo objetivo é encontrar a quadrupla (A, B, C, D) que definem o seguinte sistema[33]:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (3.46)$$

com $(u(t), y(t))$ definindo o par entrada/saída e a quadrupla (A, B, C, D) podendo ser variante ou invariante no tempo.

Baseando-se nesta definição, o *Eigensystem Realization Algorithm* é um algoritmo MIMO (*multiple-input/multiple-output*) no domínio do tempo, cujo objetivo é encontrar uma realização em espaços de estados mínima invariante no tempo, considerando uma acurácia aceitável[34]. O algoritmo, que é uma extensão do algoritmo de Ho-Kalman[35], foi desenvolvido por R. Pappa e J. Juang e utilizado na análise estrutural da sonda espacial Galileo[36].

O método ganhou diversas contribuições ao longo do tempo, como melhorias visando o desempenho computacional[37], análise da influência do ruído para a identificação de modos sistema[38], análise de como a perturbação externa influencia os modos do sistema[39] e parâmetros de qualidade para os modos encontrados pelo algoritmo[40].

O método descrito a seguir é a versão apresentada por Juang e Pappa em 1985[24], sendo esta versão comumente referenciada como original do método. A descrição matemática do indicador de pureza modal é da versão melhor apresentada pelos autores em 1986[38].

Formulação Básica

Seja um sistema dinâmico finito, discreto no tempo, linear e invariante no tempo definido pelas seguintes equações de variáveis de estado:

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (3.47)$$

sendo x um vetor de estados de dimensão n , u um vetor de entradas de dimensão m e y um vetor de saída de dimensão p . A matriz A caracteriza a dinâmica do sistema e possui dimensões $n \times n$; B é uma matriz $n \times m$; e C é uma matriz $p \times n$.

As matrizes B e C podem ser entendidas como um empilhamento de vetores,

organizados da seguinte maneira:

$$B = \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & \dots & b_m \end{bmatrix}, C^T = \begin{bmatrix} c_1^T & c_2^T & \dots & c_p^T \end{bmatrix}$$

Nesta formulação, b_i pode ser entendido como o vetor de influência no controle da i -ésima entrada e c_j o vetor de influência na medição da j -ésima saída. Duas soluções particulares para o sistema da eq. (3.47) são de interesse. A primeira é conhecida como função de resposta ao impulso, também conhecida como parâmetros de Markov:

$$y_{ji}(k) = c_j A^{k-1} b_i; \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, p; \quad k = 1, 2, \dots \quad (3.48)$$

A outra solução em particular é a função de resposta de estado inicial:

$$y_{ji}(k) = c_j A^k x_i(0) \quad (3.49)$$

O problema da realização de estado mínimo é dado pelo seguinte: sejam as funções $y_{ij}(k)$ conhecidas, construir a tupla (A, B, C) a partir de $y_{ij}(k)$ de maneira que a eq. (3.48) seja válida e que a ordem da matriz A seja mínima.

Primeiramente, forma-se a matriz blocada $r \times s$ (matriz generalizada de Hankel):

$$H_{rs}(k-1) = \begin{bmatrix} Y(k) & Y(k+t_1) & \dots & Y(k+t_{s-1}) \\ Y(j_1+k) & Y(j_1+k+t_1) & \dots & Y(j_1+k+t_{s-1}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y(j_{r-1}+k) & Y(j_{r-1}+k+t_1) & \dots & Y(j_{r-1}+k+t_{s-1}) \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

Sendo $j_i (i = 1, \dots, r-1)$ e $t_i (i = 1, \dots, s-1)$ inteiros arbitrários:

$$Y(k) = \begin{bmatrix} y_{11}(k) & y_{12}(k) & \dots & y_{1m}(k) \\ y_{21}(k) & y_{22}(k) & \dots & y_{2m}(k) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{p1}(k) & y_{p2}(k) & \dots & y_{pm}(k) \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

Com a regra de formação da matriz generalizada de Hankel, monta-se as matrizes $H_{rs}(0)$ e $H_{rs}(1)$. Fatora-se, então, a matriz blocada $H_{rs}(0)$ usando a decomposição em valor singular[41]:

$$H_{rs}(0) = P_N D_N Q_N^T \quad (3.52)$$

sendo as colunas de P_N e Q_N ortonormais e D_N a diagonal:

$$D_N = \text{diag}[d_1, d_2, \dots, d_n, d_{n+1}, \dots, d_N] \quad (3.53)$$

com $d_i (i = 1, 2, \dots, N)$ sendo monotonamente não-crescente. Isto é:

$$d_1 \geq d_2 \geq \dots \geq d_n \geq d_{n+1} \geq \dots \geq d_N \geq 0 \quad (3.54)$$

Define-se D_n partição de tamanho n da matriz diagonal D_N , ou seja, trunca-se os elementos d_{n+1}, \dots, d_N . De maneira semelhante, define-se as matrizes P_n e Q_n como partições das matrizes P_N e Q_N , excluindo-se as $N - n$ colunas finais. A realização de dimensão n do sistema da eq. (3.47) pode ser construída a partir das seguintes equações:

$$A = D_n^{-1/2} P_n^T H_{rs}(1) Q_n D_n^{-1/2} \quad (3.55)$$

$$B = D_n^{1/2} Q_n^T E_{m1} \quad (3.56)$$

$$C = E_{p1}^T P_n D_n^{1/2} \quad (3.57)$$

Sendo $E_{m1}^T = [I_m, 0]$ e $E_{p1}^T = [I_p, 0]$, com I_m e I_p sendo matrizes identidades de ordem m e p , respectivamente. De maneira mais geral, E_{mc}^T é uma matriz composta de blocos de 0 e de um bloco I_m na posição blocada c ; a mesma formulação se aplica para E_p . Note que esta realização encontrada se refere a um sistema a tempo discreto.

Determinação do Parâmetro de Corte n para a Ordem do Sistema

De maneira imediata, o parâmetro de corte n será o responsável por determinar a ordem do sistema reduzido. Este parâmetro n pode ser escolhido de maneira arbitrária, forçando que o sistema reduzido tenha determinada ordem, mas usualmente se considera outra abordagem: qual o valor de n para que a realização obtida reproduza os sinais medidos, considerando-se alguma acurácia?

Sendo a matriz diagonal D_N uma matriz cujos elementos são monotonamente não-crescentes, pode-se considerar um valor de n tal que os elementos posteriores, em comparação com o primeiro elemento d_1 , sejam menores que um limite (*threshold*). Ou seja:

$$\frac{d_n}{d_1} \geq \varepsilon_{\text{threshold}} \quad (3.58)$$

e:

$$\frac{d_{n+1}}{d_1} < \varepsilon_{\text{threshold}} \quad (3.59)$$

É apresentado pelos autores uma metodologia para encontrar o parâmetro n [38], mas se tratando de um sinal sem ruído de medição, um valor arbitrário como 10^{-4} é capaz de entregar resultados satisfatórios.

Grau de Pureza Modal

Mesmo com o truncamento do sistema produzido pela determinação do parâmetro n , o modelo reduzido encontrado pode não corresponder de maneira precisa o sistema que de fato se quer modelar. Devido às imprecisões causadas pela taxa de amostragem ou medições, o sistema encontrado pode conter modos numéricos ou espúrios. Desta maneira, convém analisar os modos encontrados quanto à qualidade dos mesmos em relação a resposta. Assim, é possível determinar quais dos modos são de fato pertencentes ao sistema e quais dos modos são decorrentes das imprecisões dos dados de entrada.

Define-se um vetor coluna q_i , referente ao comportamento histórico do modo i , como sendo:

$$q_i^* = \overline{\psi}_i^T D_N^{1/2} Q_N^T \begin{bmatrix} E_{m1} & E_{m2} & \dots & E_{mn_c} \end{bmatrix}; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.60)$$

Sendo $\overline{\psi}_i^T$ a i -ésima linha da matriz inversa Ψ^{-1} de autovetores à direita. Define-se também um vetor coluna \tilde{q}_i^* referente a extrapolação ideal do histórico do modo i :

$$\tilde{q}_i^* = \begin{bmatrix} 1 & z_i & z_i^2 & \dots & z_i^{n_c} \end{bmatrix} \overline{\psi}_i^T B; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.61)$$

Define-se, por fim, o parâmetro de Coerência de Amplitude Modal γ_i , que mensura o grau de pureza modal do i -ésimo modo. O parâmetro γ_i satisfaz a seguinte relação:

$$\gamma_i = \frac{|\tilde{q}_i^* q_i|}{\sqrt{(\tilde{q}_i^* \tilde{q}_i)(q_i^* q_i)}} \quad (3.62)$$

O parâmetro γ_i pode ser entendido como o módulo cosseno do ângulo formado entre os dois vetores q_i e \tilde{q}_i ; e portanto só pode assumir valores entre 0 e 1. Quando $q_i \rightarrow \tilde{q}_i$, $\gamma_i \rightarrow 1$, indicando que o autovalor z_i está muito próximo do valor do i -ésimo modo do sistema. Por outro lado, quando $\gamma_i \rightarrow 0$, o autovalor z_i se comporta como um modo espúrio ou decorrente de ruído de medição.

As demonstrações das eqs. (3.60) a (3.62) se encontram nos artigos mencionados de Juang e Pappa[24, 38].

3.2.4 Comparação entre os Métodos

Existem muitas abordagens possíveis a serem seguidas quando surge a necessidade de se comparar métodos, algoritmos e procedimentos. De maneira central, é preciso

definir o contexto em que será inserido o objeto testado, pois as características intrínsecas de sua função e uso serão, naturalmente, parâmetros de comparação. Em determinado contexto, como o VSA/DSA para simulação *online*, o desempenho computacional é crucial; para o contexto *offline*, outras características podem se sobressair como a estabilidade ou precisão do método.

Para este trabalho, considera-se um método que deve ser integrado a uma ferramenta de uso tanto *online* quanto *offline*; que não requeira intervenção do usuário para a escolha de parâmetros de entrada; e que necessite da menor quantidade de bibliotecas matemáticas possível, pois, em sua ausência, seria necessário desenvolver um algoritmo eficiente para as mesmas. Como testes, serão avaliadas quatro situações: a resposta para um sinal simples, contendo apenas uma exponencial amortecida; a resposta para um sinal constituído pela soma exponenciais amortecidas; a resposta para um sinal simples acrescido de ruído branco; e a resposta para um sinal não-linear, obtido a partir de simulação realizada pelo Anatem. Para os três primeiros casos (apêndice A), os modos a serem encontrados são previamente conhecidos; para o sinal do Anatem, usar-se-á o software PacDyn para encontrar os modos do sistema e serão utilizados como valor de referência para a validação.

Inicialmente, desenvolveu-se os algoritmos apresentados em MATLAB, por ser uma ferramenta de fácil implementação e com vasta contribuição por parte de usuários na Internet. O Método dos Picos-Sucessivos encontra-se na íntegra no apêndice B. O Método ERA é muito simples de ser implementado, sendo a montagem da matriz de Hankel a parte mais complexa do método, com o código MATLAB encontrando-se em [42]. O Método de Prony utilizado é um *toolbox* que pode ser encontrado no programa “File Exchange” da Mathworks[43].

Sinal Não-Linear

Se tratando de sistemas não-lineares, existe uma classe muito grandes de funções e sistemas que poderiam ser testados. Contudo, como o objetivo é a determinação de amortecimento das máquinas de um sistema de potência, é razoável testar os algoritmos em sinais que sejam oriundos de uma simulação dinâmica de sistemas de potência. Para a análise de um sinal não-linear, será considerada a resposta no tempo do sinal de frequência e do ângulo δ da máquina da barra 1 do caso “9 Barras” que acompanha a pasta Exemplos do Anarede, cujo diagrama se encontra na fig. 3.1. O sistema original, juntamente com os dados elétricos, se encontram na referência [44]. Este caso foi preparado para ilustrar a ferramenta de Região de Segurança Estática e Dinâmica dos programas Anarede e Anatem.

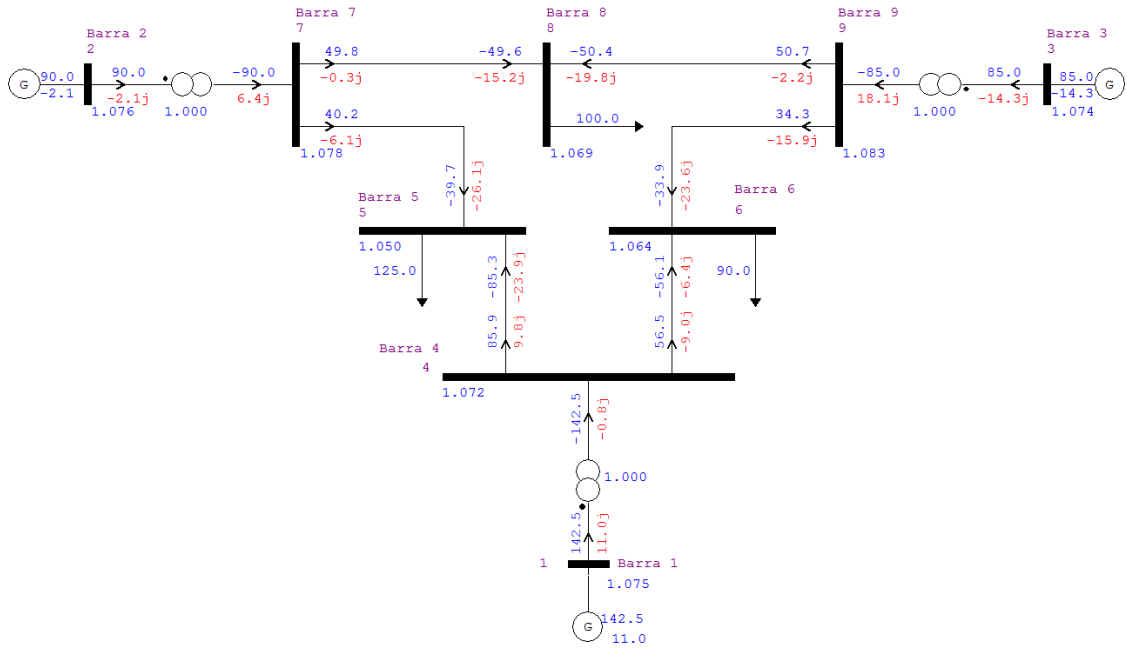


Figura 3.1: Diagrama Unifilar do Caso 9 Barras

Para este sistema e seus dados dinâmicos contidos no exemplo, aplica-se um curto-circuito trifásico no circuito 4-5 (na extremidade da barra 4) e então remove-se o curto com a abertura deste circuito. Considerando apenas a resposta após o distúrbio, tem-se a seguinte resposta no tempo da frequência e ângulo de carregamento δ para a máquina 1.

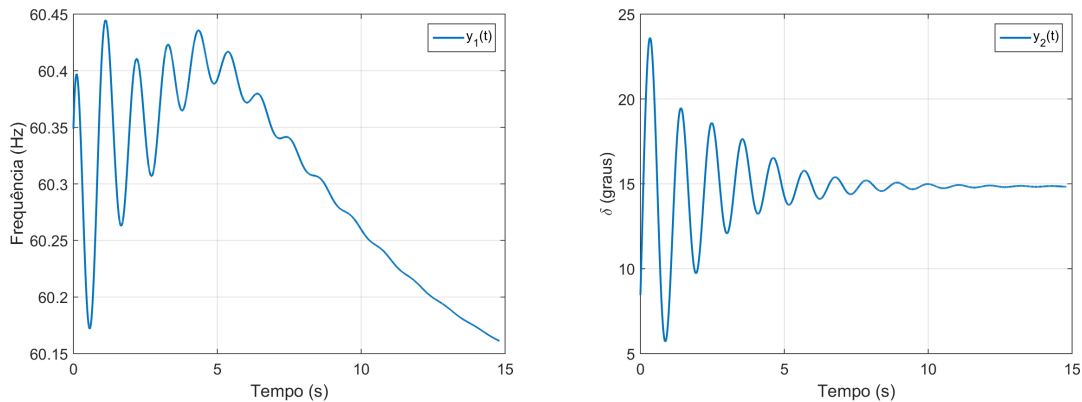


Figura 3.2: Resposta no Tempo para um Curto 3ϕ na LT4-5 do Sistema 9 Barras

Após a remoção do curto-circuito, o sistema se acomoda em uma nova configuração, onde a diferença topológica entre um sistema e outro está na ausência do circuito que conectava as barras 4 e 5. Considerando esta condição de operação, o PacDyn encontra os seguintes modos no sistema linearizado, além dos fatores de participação², através do método QR:

²Fatores de Participação podem ser vistos como a medida da participação relativa de uma dada variável (usualmente uma variável de estado) em um modo de oscilação[45]

Tabela 3.1: Polos encontrado pelo PacDyn para o Sistema “9 Barras” sem a LT4-5

λ_i	ξ_i (%)	Fator de Participação	
-1.e-12	-	DELTA Barra 3	#3
-0.4210 ± j5.8155	7.2206	DELTA Barra 1	#1
-0.9503 ± j7.3215	12.871	DELTA Barra 3	#3
-0.6670 ± j1.2624	46.717	EQ' Barra 1	#1
-0.6744 ± j1.0255	54.948	EQ' Barra 2	#2
-5.2623 ± j7.8552	55.656	x 0008 DRGTMD01	#1
-5.2368 ± j7.8056	55.713	x 0008 DRGTMD01	#1
-5.1925 ± j7.7087	55.867	x 0008 DRGTMD01	#1
-0.6532 ± j0.9230	57.769	WW Barra 2	#2
-0.6693 ± j0.8637	61.254	EQ' Barra 3	#3
-22.539	100.00	x 0004 DRGVMD01	#1
-22.529	100.00	x 0004 DRGVMD01	#1
-22.518	100.00	x 0004 DRGVMD01	#1
-13.848	100.00	EQ" Barra 3	#3
-13.354	100.00	EQ" Barra 1	#1
-12.686	100.00	EQ" Barra 1	#1
-9.1097	100.00	ED" Barra 3	#3
-8.5607	100.00	ED" Barra 1	#1
-7.0736	100.00	ED" Barra 3	#3
-5.5086	100.00	x 0018 DRGVMD01	#1
-5.2101	100.00	x 0018 DRGVMD01	#1
-4.2730	100.00	x 0018 DRGVMD01	#1
-1.8776	100.00	x 0008 DRGVMD01	#1
-1.8110	100.00	x 0008 DRGVMD01	#1
-0.1199	100.00	x 0005 DRGVMD01	#1
-0.0166	100.00	x 0005 DRGVMD01	#1
-0.0166	100.00	x 0005 DRGVMD01	#1

Os métodos serão testados para os dois sinais, frequência e δ , e para cinco intervalos de amostragem $T_s = \{1ms, 10ms, 100ms, 200ms, 500ms\}$. O modo encontrado para o sinal frequência pelo Método dos Picos-Sucessivos se encontra na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Resultado do modo encontrado para o sinal não-linear de frequência pelo Método dos Picos-Sucessivos para diferentes intervalos de amostragem

T_s (ms)	λ	ξ
1	-0.0308 ± j6.0573	0.0051
10	-0.0310 ± j6.0582	0.0051
100	-0.0329 ± j6.0250	0.0055
200	-0.0247 ± j6.1087	0.0040
500	-0.0091 ± j5.7120	0.0016

O modo encontrado para todos os tempos de amostragem se mostrou bastante

distante dos modos que o PacDyn encontrou, embora consistente nos vários intervalos de amostragem utilizados. O amortecimento para essa exponencial envoltória se mostrou extremamente baixo. De fato, pode-se observar pela fig. 3.3 que a parte real dessa exponencial complexa é numericamente muito baixa.

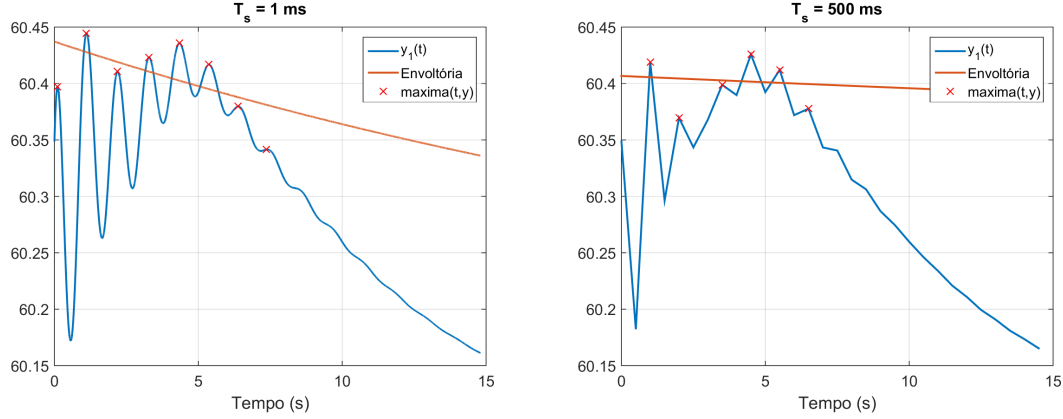


Figura 3.3: Exponencial Envoltória gerada pelo Método dos Picos-Sucessivos para um sinal não-linear de frequência

Utilizando o sinal de δ como entrada para o algoritmo, gerou-se a tabela 3.3.

Tabela 3.3: Resultado do modo encontrado para o sinal não-linear de δ pelo Método dos Picos-Sucessivos para diferentes intervalos de amostragem

T_s (ms)	λ	ξ
1	$-0.4020 \pm j5.8587$	0.0684
10	$-0.4046 \pm j5.8555$	0.0689
100	$-0.4060 \pm j5.8344$	0.0695
200	$-0.4078 \pm j5.9189$	0.0687
500	$-0.3746 \pm j5.9840$	0.0625

O modo encontrado em todos os intervalos de amostragem utilizados se aproxima do modo $\lambda_i = -0.4210 \pm j5.8155$ encontrado pelo PacDyn. Contudo, como o método não se propõe a identificar os modos reais do sistema e sim a encontrar uma exponencial que descreva o amortecimento do sinal, é preciso observar se esse modo encontrado satisfaz à premissa inicial. Para dois intervalos de amostragem, $T_s = 1ms$ e $T_s = 500ms$, a exponencial encontrada está representada na fig. 3.4.

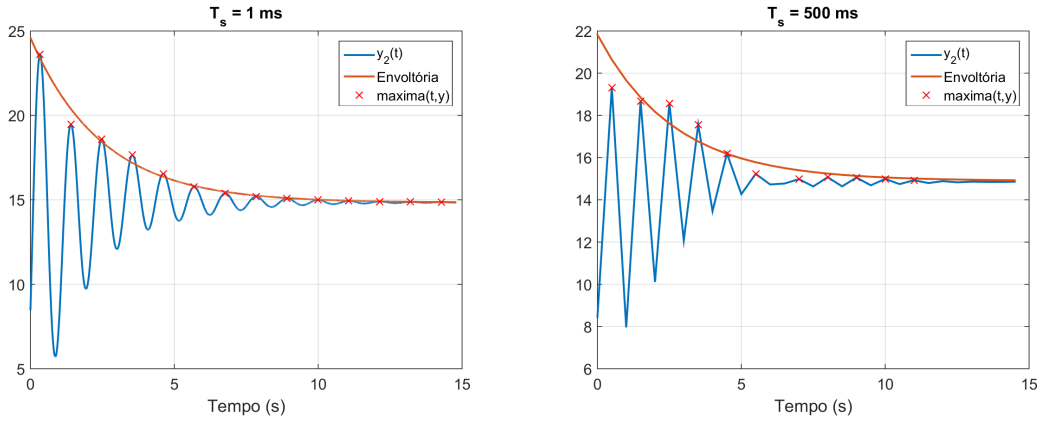


Figura 3.4: Exponencial Envoltória gerada pelo Método dos Picos-Sucessivos para um sinal não-linear de δ

As exponencias envoltórias encontradas atendem a premissa básica de descrever o amortecimento das oscilações não-lineares. Pode-se dizer também que, embora tenha sofrido alguma degradação de qualidade para um intervalo de amostragem mais elevado, o método foi capaz de encontrar uma exponencial satisfatória em todos os intervalos de amostragem utilizados. O ruído de simulação presente nos sinais não comprometeu o método mesmo para um $T_s = 1ms$, como previsto no teste do sinal ruidoso, pois a amplitude das oscilações na janela de tempo amostrada é superior ao ruído de simulação.

Fazendo o mesmo procedimento de análise para o Método de Prony, os resultados para o sinal de frequência se encontram na tabela 3.4:

Tabela 3.4: Resultado do Método de Prony para o sinal não-linear de frequência, $p = 9$ e diferentes intervalos de amostragem T_s

T_s (ms)	λ_i	ξ_i	T_s (ms)	λ_i	ξ_i
10			200		
	$-1.6e-6 \pm j282.43$	$5.7e-9$		$-0.4888 \pm j14.136$	0.0345
	$-1.6e-6 \pm j218.90$	$7.3e-9$		$-0.4884 \pm j10.991$	0.0443
	$-1.6e-6 \pm j155.08$	$1.0e-8$		$-0.5003 \pm j7.8544$	0.0635
	$-1.6e-6 \pm j90.254$	$1.8e-8$		$-0.3264 \pm j4.7087$	0.0691
	-0.0002	1.0000		-0.0003	1.0000
100			500		
	$-0.2175 \pm j28.243$	0.0077		$-0.43896 \pm j5.8530$	0.0747
	$-0.2190 \pm j21.891$	0.0100		$-0.46902 \pm j4.2343$	0.1100
	$-0.2244 \pm j15.510$	0.0144		$-0.65004 \pm j1.2915$	0.4495
	$-0.2649 \pm j9.0265$	0.0293		$-0.25741 \pm j0.2005$	0.7888
	-0.0003	1.0000		-0.0001	1.0000

Para os intervalos de amostragem $T_s = 200ms$ e $T_s = 500ms$, a realização encontrada se mostrou mais próxima do modelo linear determinado pelo PacDyn.

Contudo, para $T_s = 200ms$, muitos modos menos amortecidos foram encontrados; já para $T_s = 500ms$, o modo menos amortecido encontrado corresponde ao modo menos amortecido encontrado pelo PacDyn. A avaliação da influência da ordem p do sistema não será apresentada, mas os resultados são semelhantes aos já observados nos testes realizados. Para o sinal de δ , faz-se os mesmos casos. Os resultados se encontram na tabela 3.5.

Tabela 3.5: Resultado do Método de Prony para o sinal não-linear de δ , $p = 9$ e diferentes intervalos de amostragem T_s

T_s (ms)	λ_i	ξ_i	T_s (ms)	λ_i	ξ_i
10			200		
	$4.e-12 \pm j62.998$	$-6.e-14$		$-0.7705 \pm j11.282$	0.0681
	$3.e-12 \pm j125.74$	$-2.e-14$		$-0.4296 \pm j5.8666$	0.0730
	$3.e-12 \pm j188.53$	$-2.e-14$		$-1.1623 \pm j14.343$	0.0807
	$3.e-12 \pm j251.34$	$-1.e-14$		$-0.6567 \pm j1.2251$	0.4724
	$3.e-12 + j314.16$	$-1.e-14$		-0.0005	1.0000
100			500		
	0.0042	-1.0000		$-0.1067 \pm j3.8301$	0.0278
	$-0.1689 \pm j28.173$	0.0059		$-0.4459 \pm j5.8113$	0.0765
	$-0.1715 \pm j21.657$	0.0079		$-1.5997 + j6.2832$	0.2467
	$-0.1813 \pm j15.006$	0.0120		$-0.7172 \pm j1.0483$	0.5646
	$-0.7344 \pm j6.8061$	0.1072		$-8.3e-5$	1.0000
				-0.9581	1.0000

Considerando que o modo de interesse é o modo $\lambda_i = -0.4210 \pm j5.8155$, encontrado pelo PacDyn, pode-se afirmar que o Método de Prony encontrou o modo desejado usando o sinal de δ e para $T_s = 200ms$ e $T_s = 500ms$. Contudo, outros modos (menos amortecidos) foram encontrados nesses dois casos. Esses modos poderão comprometer o resultado do algoritmo, que retorna o menor amortecimento encontrado.

Para o Método ERA, encontrou-se os resultados para um mesmo intervalo de amostragem T_s utilizado no Método de Prony, de acordo com a tabela 3.6 para o sinal de frequência e tabela 3.7 para δ .

Tabela 3.6: Resultado do Método ERA para frequência com diferentes T_s

T_s (ms)	λ_i	γ_i	ξ_i	T_s (ms)	λ_i	γ_i	ξ_i
10				200			
	$-0.1629 \pm j0.4400$	0.9468	0.3471		$-0.2016 \pm j0.0384$	0.9325	0.4640
	$-0.3645 \pm j5.7942$	0.9919	0.0628		$-0.3596 \pm j5.8498$	0.9943	0.0613
	-0.0003	1.0000	1.0000		0.0004	1.0000	1.0000
100				500			
	$-0.1769 \pm j0.4141$	0.9443	0.3930		$-0.6699 \pm j5.3548$	0.9367	0.1241
	$-0.3593 \pm j5.8196$	0.9932	0.0616		$-0.3085 \pm j0.5450$	0.9513	0.5697
	-0.0003	1.0000	1.0000		-0.0004	1.0000	1.0000

Tabela 3.7: Resultado do Método ERA para δ com diferentes T_s

T_s (ms)	λ_i	γ_i	ξ_i	T_s (ms)	λ_i	γ_i	ξ_i
10				200			
	$-1.0143 \pm j10.638$	0.9471	0.0949		$-1.5687 \pm j10.885$	0.9834	0.1426
	$-0.6477 \pm j7.5840$	0.9918	0.0851		-0.1521	0.9905	1.0000
	-0.1378	0.9960	1.0000		$-0.7042 \pm j7.4726$	0.9973	0.0938
	$-0.8657 \pm j4.6334$	0.9990	0.1836		$-0.9227 \pm j4.6369$	0.9996	0.1951
	$-0.6229 \pm j1.0998$	0.9999	0.4928		$-0.6140 \pm j1.0959$	0.9999	0.4888
	$-0.4428 \pm j5.8528$	1.0000	0.0754		$-0.4435 \pm j5.8517$	1.0000	0.0755
	0.0006	1.0000	-1.0000		0.0004	1.0000	-1.0000
100				500			
	$-1.1400 \pm j10.599$	0.9586	0.1069		-0.1634	0.9960	1.0000
	$-0.6741 \pm j7.5896$	0.9932	0.0884		$-0.9998 \pm j4.6134$	0.9999	0.2118
	-0.2389	0.9945	1.0000		$-0.6212 \pm j1.1033$	0.9999	0.4906
	$-0.8572 \pm j4.6456$	0.9990	0.1814		$-0.4446 \pm j5.8443$	1.0000	0.0758
	$-0.6307 \pm j1.0964$	0.9999	0.4986		0.0004	1.0000	-1.0000
	$-0.4429 \pm j5.8530$	1.0000	0.0754				
	0.0002	1.0000	-1.0000				

Utilizando a referência de γ apresentada por Juang e Pappa[24] ($\gamma > 0.95$), o algoritmo encontrou para o sinal de frequência o modo $\lambda_i = -0.4210 \pm j5.8155$, dentro de parâmetros razoáveis de acurácia ($\varepsilon_{f(\lambda)} \lesssim 0.1\%$), para todos os intervalos de amostragem exceto $T_s = 500ms$; embora o amortecimento encontrado para esses modos tenha sido consideravelmente inferior (diferença de $1pp$). Para o sinal de δ , todos os intervalos de amostragem utilizados trouxeram resultados válidos: a acurácia foi menor ($\varepsilon_{f(\lambda)} \lesssim 0.6\%$) mas o amortecimento encontrado se aproximou mais do valor encontrado pelo PacDyn (diferença de $0.3pp$).

Os outros modos encontrados para o sinal de δ podem tanto se referir a um modo real do sistema (como $\lambda_i = -0.6744 \pm j1.0255$) quanto a modos matemá-

ticos encontrados não para representar o ruído de simulação (pois estes já foram descartados), mas sim para tentar adequar uma resposta de um sistema **não-linear** a uma resposta de um sistema linear. A fig. 3.5 ilustra a resposta não-linear $y(t)$ e a resposta linear $\hat{y}(t)$ de uma realização que tenta reproduzir o sistema.

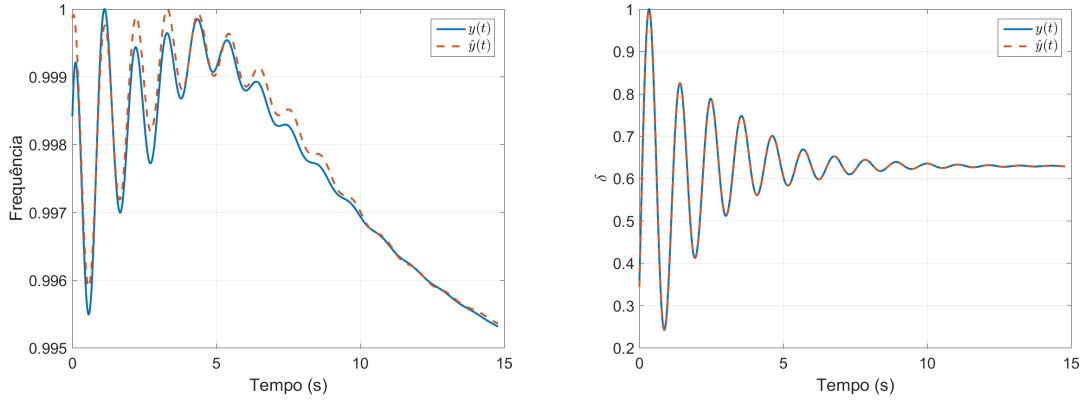


Figura 3.5: Comparação do sinais normalizados de frequência e δ com a realização encontrada, para $T_s = 10ms$

Uma consideração que deve ser feita: como o sistema é não-linear, as grandes oscilações tendem a diferir de oscilações vistas em sistemas lineares. Por consequência, sinais utilizados que contenham essas grandes oscilações podem levar a realizações mais imprecisas. Assim, recomenda-se a captura do sinal alguns segundos após o último evento realizado no sistema.

Para um sinal de δ , por exemplo, adquirido 5 segundos após o extermínio do curto aplicado, para um $T_s = 10ms$, o Método ERA encontra os seguintes modos: $\lambda_1 = -0.7234 \pm j1.2927$, $\lambda_2 = -0.4425 \pm j5.8493$ e $\lambda_3 = -1.3e-5$. Os dois primeiros modos correspondem aos modos cujos fatores de participação estão relacionados à tensão transitória do eixo de quadratura e ângulo de carregamento.

Conclusão

Considerando todos os testes realizados (sinal não-linear e os testes do apêndice A) e características inerentes aos métodos, o Método ERA se mostrou mais robusto, eficiente e com uma característica nativa de selecionar modos em sua realização de maneira a encontrar uma realização mínima, divergindo dos resultados obtidos em [25]. Em relação ao sinal a ser utilizado para a determinação do amortecimento, δ e frequência são variáveis de estado relacionadas e apresentaram bons resultados; contudo será utilizado o sinal de frequência (mais especificamente, o desvio de frequência) uma vez que o mesmo é também utilizado como entrada nos estabilizadores de sistemas de potência (PSS).

3.3 Implementação Computacional

Como o programa Anatem é um programa desenvolvido em Fortran, o método foi escrito na mesma linguagem, fazendo uso dos recursos permitidos pelo Fortran 90/95 e 2003, assim como o software auxiliar AnaviSSA. O visualizador gráfico SSA_Viewer, contudo, foi desenvolvido em Python fazendo uso das bibliotecas PyQt4.0 e Matplotlib.

A rotina que monta a matriz de Hankel é *ipsis litteris* do algoritmo MATLAB que se encontra na Tese de Mestrado de Enrique Antonio Medina[42], fazendo uso do recurso do Fortran 90/95 de atribuições matriciais por fatias de vetores[46]. As rotinas de cálculo de valores singulares, cálculo de autovalores e autovetores e a rotina de inversão de matrizes são as encontradas na biblioteca LAPACK, disponibilizadas em Fortran[47].

Além do método matemático que estima o amortecimento, é preciso definir também o fluxo de dados dos programas Anarede e Anatem para incluir essa informação de amortecimento no resultado final: os nomogramas.

3.3.1 SSA pelo Anatem

O software PacDyn é capaz de rodar Avaliação de Segurança a Pequenos Sinais (em desenvolvimento), fazendo uma análise do pior amortecimento encontrado entre todos os modos do sistema (resolução QR) ou entre modos para os quais o método convergiu (DPSE), para o caso base e o caso em contingência. Essa região de segurança segue a mesma lei de construção que a região de segurança VSA/DSA gerada pelo programa Anarede, requerendo os mesmos arquivos de dados dinâmicos e de contingências dinâmicas necessários para o Anatem verificar o DSA; apesar da execução do SSA ser independente do VSA/DSA.

Para o caso do Anatem, utiliza-se a estrutura de VSA/DSA já implementada. O Anarede é responsável por gerar o arquivo *releasedtoanatem*³ e todos os arquivos dinâmicos a serem utilizados pelas diferentes instâncias de Anatem. Coordenado pelo programa auxiliar RunManager (na modalidade paralelo ou sequencial), várias instâncias do Anatem são chamadas de acordo com os casos listados no arquivo *releasetoanatem*. O resultado do Anatem é um arquivo em formato texto (.txt) em que se diz quais limites foram violados.

Depois de todas as simulações terem sido realizadas, um software auxiliar (Anavis) é invocado. Este software é responsável por concatenar todos os resultados individuais dos casos (arquivos .txt mencionados anteriormente) num conjunto de arquivos a serem lidos pelo software auxiliar VisorChart, responsável pela visualização dos nomogramas do VSA e DSA.

³Este arquivo contém uma lista de casos que estão prontos para serem processados pelo Anatem

Para se simular o SSA, não é preciso nenhuma informação a mais. Juntamente com os arquivos .txt provenientes das simulações, arquivos .fssa são gerados. Nestes arquivos, consta o valor numérico do menor amortecimento observado. É então chamado (por hora de maneira manual) um pequeno software para concatenar esses dados provenientes do .fssa num arquivo de plotagem de nomograma tipo-SSA (AnaviSSA). O resultado é um arquivo .ssa que pode ser lido por outro software desenvolvido (SSA_Viewer).

As figs. 3.6 a 3.8 mostram de maneira mais didática o fluxo de dados.

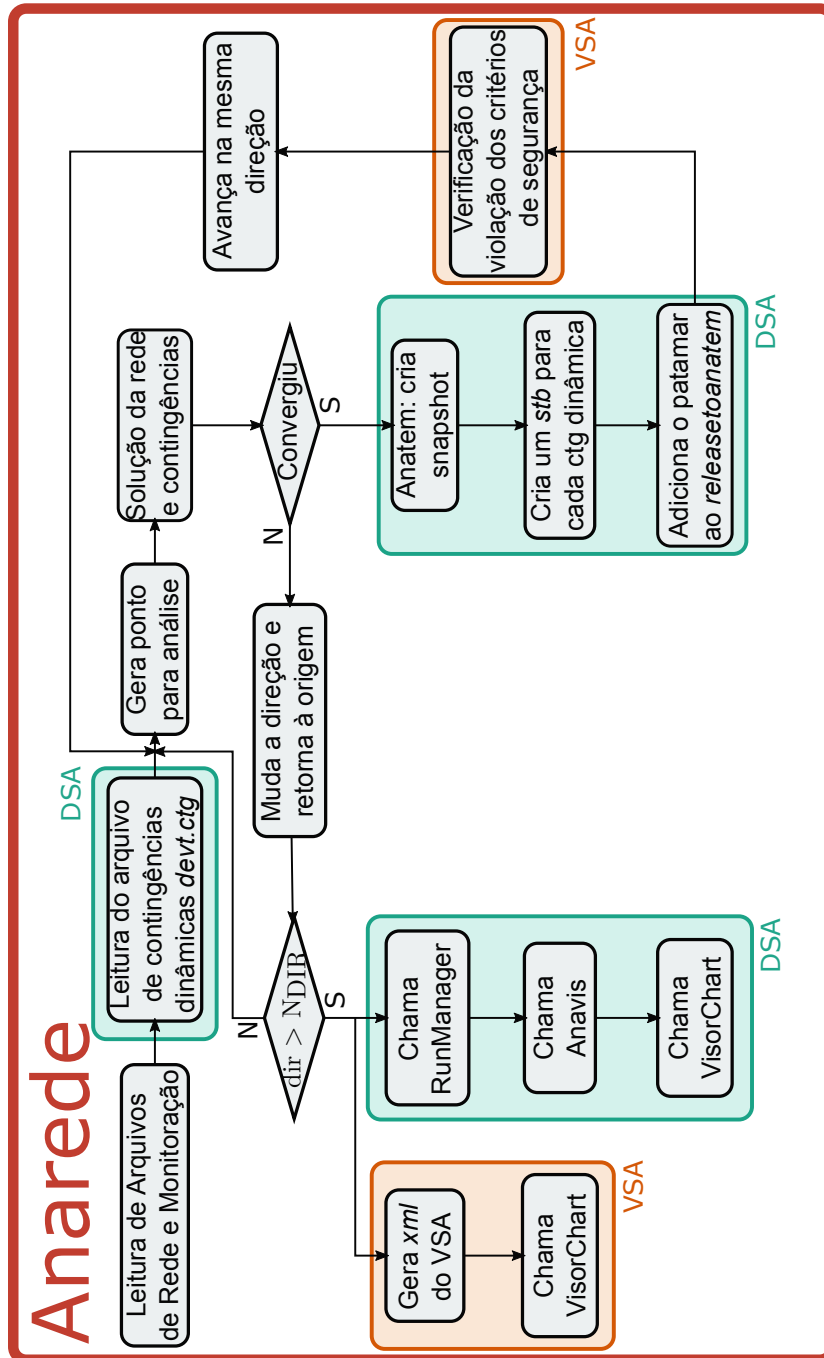


Figura 3.6: Fluxo de dados no programa Anarede para VSA/DSA

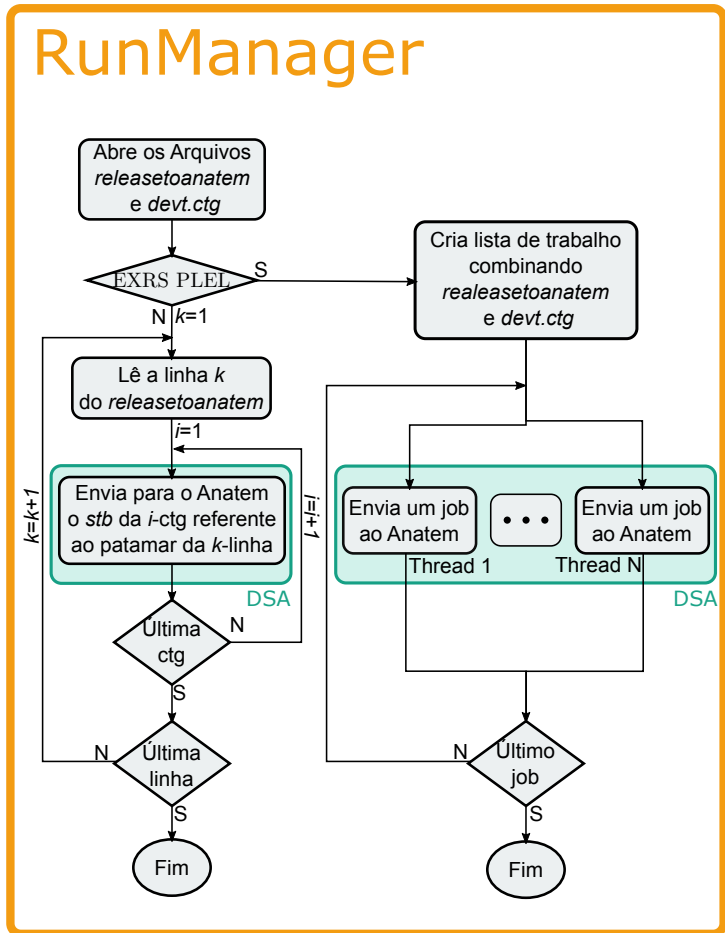


Figura 3.7: Fluxo de dados no programa RunManager para DSA

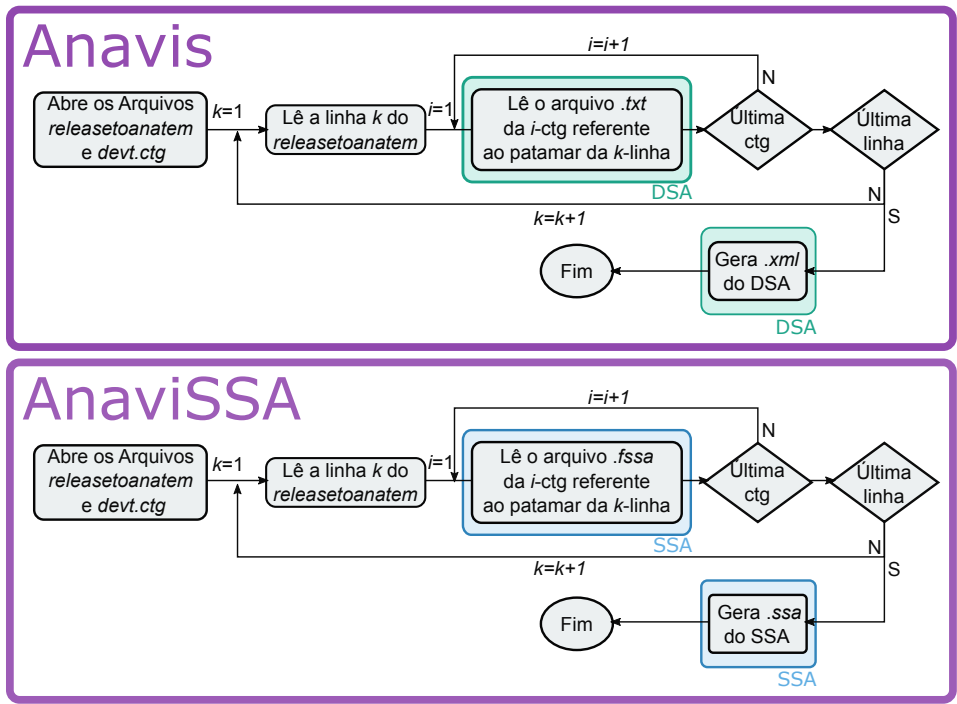


Figura 3.8: Fluxo de dados nos programas Anavis e AnaviSSA para DSA

3.3.2 Implementação no Anatem

Havendo o código sido desenvolvido em um módulo Fortran para o processamento de um sinal de frequência previamente obtido, facilmente o algoritmo pode ser integrado ao restante do código. Uma única outra implementação feita é referente à captura dos pontos de interesse. Considerando o algoritmo de solução do Anatem, o momento em que essa captura é realizada e quando o amortecimento é determinado se encontram no fluxograma da fig. 3.9.

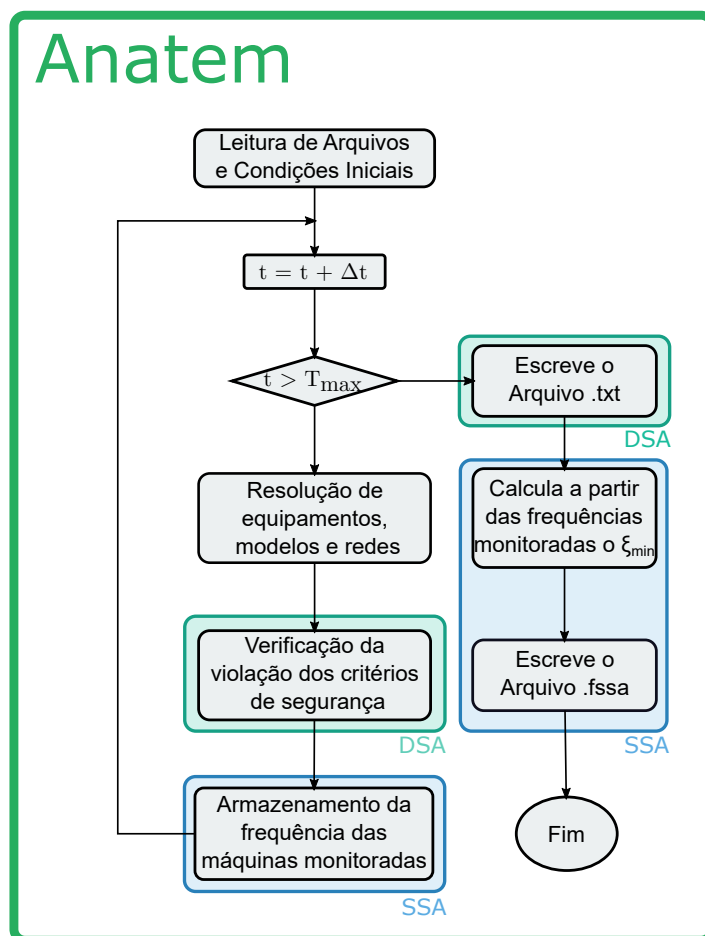


Figura 3.9: Fluxo de dados no programa Anatem para SSA

Portanto, em acréscimo à funcionalidade DSA, as inclusões no código podem ser resumidas em três blocos: o armazenamento da frequência das máquinas monitoradas; o cálculo de ξ (mostrado anteriormente); e a escrita do arquivo de saída “.fssa”.

Definição das Máquinas Monitoradas e Armazenamento de Frequência

A ferramenta VSA/DSA gera nomogramas de segurança estática e dinâmica, considerando como critério violações de tensão e fluxo. Essas violações, naturalmente, são definidas por elementos que estão sendo ativamente monitorados no sistema.

Através de códigos de execução apropriados no Anarede (DMGR, DMTE, DMFL)⁴, pode-se selecionar regiões específicas do sistema para serem monitoradas para a determinação da região de segurança estática.

Para a região dinâmica, o Anatem utiliza como informação de monitoração àquela que foi utilizada no Anarede. Sendo assim, decorre que as máquinas monitoradas para a avaliação de amortecimento são definidas previamente no Anarede pela monitoração de geração (DMGR), a mesma que verifica os limites de potência reativa das máquinas durante a construção da região de segurança. Na ausência deste dado, considera-se que todas as máquinas do sistema são monitoradas; esta lógica também se aplica à monitoração de tensão e fluxo, no caso da ferramenta DSA.

Armazena-se o desvio de frequência das máquinas monitoradas a cada Δt segundos em uma estrutura de dados (como uma lista encadeada do apêndice B.2). Só devem ser armazenados pontos que estão a alguns segundos de distância do último evento do sistema (pois o objetivo é capturar oscilações que sejam mais próximas de oscilações de um sistema linear). Caso aconteça algum evento no sistema ao decorrer da simulação (como falha de comutação de elos de corrente contínua ou comutação automática para Newton), descarta-se todos os pontos armazenados, reiniciando a captura de pontos. O método ERA, em sua formulação apresentada, requer que o intervalo de amostragem seja constante ao longo da simulação, logo, mudanças no passo de simulação também provocam a perda dos pontos armazenados.

Considerando que todos os cuidados foram tomados, os sinais armazenados, ao final do processo, são empilhados em uma matriz $Y(t)$ que será utilizada para a montagem das matrizes H_0 e H_1 .

Resumo do Algoritmo ERA para a Estimação de amortecimento

A implementação do algoritmo ERA pode ser resumida nos seguintes passos:

1. Montar H_0 e H_1 a partir dos dados temporais
2. Encontrar as matrizes relacionadas aos valores singulares (decomposição em valores singulares) da matriz H_0 :

$$H_0 = PDQ^T$$

3. A partir de um valor limite $\varepsilon_{\text{threshold}}$, encontrar o valor de n tal que:

$$D_n = D_{n \times n} \in D_{r \times s} \mid \text{posto}(D_n) = n \text{ e } \min(\lambda(D_n)) > \varepsilon_{\text{threshold}}$$

⁴Esses códigos serão melhor descritos na seção 4.3.1

4. Montar a matriz A com as matrizes P_n , D_n e Q_n^T particionadas:

$$A = D^{-1/2} P H_1 Q^T D^{-1/2}$$

Sendo $P_n = P(:, 1:n)$, $Q_n^T = Q^T(1:n, :)$ e $D_n = D(1:n, 1:n)$

5. Encontrar as matrizes de autovalores e autovetores de A :

$$\psi^{-1} A \psi = \lambda_z$$

6. Transformar os autovalores em z para autovalores em s :

$$\lambda_s = \frac{\ln(\lambda_z)}{\Delta t}$$

7. Calcular o amortecimento dos autovalores em s :

$$\xi = \frac{\text{Re}[\lambda_s]}{|\lambda_s|}$$

8. Montar a matriz de controlabilidade:

$$C o = D_n^{1/2} Q_n^T$$

9. Montar a matriz elementar E :

$$E = \begin{bmatrix} E_{m1} & E_{m2} & E_{m3} & \dots \end{bmatrix}, \quad E_{mi} = \begin{bmatrix} \underline{0} \\ \underline{1} \\ \underline{0} \end{bmatrix} \leftarrow \text{bloco } i$$

10. Calcular a resposta dos j -ésimo modo ideal:

$$q_j^z = \begin{bmatrix} z_j^0 & z_j^1 & z_j^2 & \dots \end{bmatrix}$$

$$q_j = q_j^z \psi_j^T D^{1/2} Q^T E_{m1}, \quad \psi_j^T \triangleq \psi^{-1}(j, :)$$

11. Calcular a resposta modal do j -ésimo modo do sinal amostrado:

$$\bar{q}_j = \psi_j^T C o E$$

12. Calcular o parâmetro de pureza modal γ_j :

$$\gamma_j = \frac{|\bar{q}_j \cdot q_j|}{\sqrt{|\bar{q}|_2 \cdot |q_j|_2}}$$

13. Repetir do passo 10 ao passo 12 para os n modos e encontrar ξ_{sis} :

$$\xi_{\text{sis}} = \min(\Xi_\gamma)$$

$$\Xi_\gamma = \{\xi_j \in \Xi | \gamma_j \geq \gamma_{\text{threshold}}, j = 1, 2, \dots, n\}$$

Arquivo de saída .fssa

A ferramenta de DSA do Anatem escreve, ao final da simulação, um pequeno arquivo para cada caso contendo informações como o ponto de operação no plano dos grupos geradores $G1 \times G2 \times G3$, o identificador da contingência aplicada e as informações das possíveis violações. Um exemplo deste arquivo se encontra na fig. 3.10.

```
<generatingPoint G1= 2752.14 G2= 1698.00 G3= 2397.00 T="Limite de Seguranca" C="LT_16_26_1" D=0000 seguro=1 violado=1>
<limit tag="Limite de MW" violado=0>
<limit tag="Limite de Mvar" violado=0>
<limit tag="Limite Térmico" violado=1>
<limit tag="Limite de Tensão" violado=0>
<limit tag="Limite de Segurança" violado=0>
```

Figura 3.10: Exemplo de arquivo .txt do DSA

Para a informação do amortecimento, optou-se por gerar um novo arquivo de texto de saída. O objetivo de se gerar este outro arquivo ao invés de modificar a saída do .txt já gerado está na preservação da compatibilidade do programa Anavis com seu arquivo esperado de entrada.

O arquivo gerado .fssa é um arquivo bem pequeno (a exemplo do arquivo .txt), contendo apenas a seguinte informação:

```
Amortecimento minimo=      0.031438
```

Figura 3.11: Exemplo de arquivo .fssa do SSA

3.3.3 Programas Auxiliares Desenvolvidos

Descreve-se a seguir os programas auxiliares que foram desenvolvidos no trabalho.

AnaviSSA

O AnaviSSA é um pequeno software Fortran auxiliar cuja função é fazer (parcialmente) para o SSA o que o Anavis faz para o VSA/DSA: agregar as informações das diversas simulações a partir de vários arquivos (.fssa). A diferença está no arquivo de saída. Pela natureza do visualizador SSA_Viewer, no arquivo .ssa não consta onde e quais limites foram violados; ao invés disso, o arquivo .ssa contém uma série de informações adicionais. Note que este arquivo é utilizado pelo PacDyn para a montagem de seus nomogramas de amortecimento quanto pelo Anatem via DSA para o mesmo propósito.

No arquivo agregado .ssa (fig. 3.12), muitas informações estão gravadas, num formato tabelado (arquivo tipo .csv). São elas:

- as potências de cada grupo gerador;
- as regiões (1 a 3) enquanto a violação ou não (Critérios de amortecimento definidos pelo SSA do PacDyn) para o caso base e (4-6) para a pior contingência;
- a direção de crescimento a que pertence o ponto em questão;
- o arquivo histórico que contém o ponto em questão;
- o caso do arquivo histórico referente ao ponto em questão;
- o menor amortecimento observado para o caso base;
- a descrição para o caso base. “Normal Case” para ponto que tenha convergido e “Ignored” para ponto com problema de convergência;
- o menor amortecimento observado em todas as contingências;
- a descrição da contingência com o pior amortecimento observado.

(PG1)	(PG2)	(PG3)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(D)	(SAVECASE)	(H)	(DAMP)	(DESCR)	(DAMP)	(DESCR)
142.49	90.00	85.00	0	0	0	1	0	0	1	..\Sim_0001_0001_0000.sav	1	0.1251	Normal Case	0.0722	LT_4_5_1
141.08	90.71	85.71	0	0	0	1	0	0	1	..\Sim_0001_0001_0000.sav	2	0.1252	Normal Case	0.0725	LT_4_5_1
139.66	91.42	86.42	0	0	0	1	0	0	1	..\Sim_0001_0001_0000.sav	3	0.1254	Normal Case	0.0727	LT_4_5_1
138.25	92.14	87.14	0	0	0	1	0	0	1	..\Sim_0001_0001_0000.sav	4	0.1255	Normal Case	0.0730	LT_4_5_1
136.84	92.85	87.85	0	0	0	1	0	0	1	..\Sim_0001_0001_0000.sav	5	0.1257	Normal Case	0.0732	LT_4_5_1
135.42	93.56	88.56	0	0	0	1	0	0	1	..\Sim_0001_0001_0000.sav	6	0.1258	Normal Case	0.0735	LT_4_5_1
134.01	94.27	89.27	0	0	0	1	0	0	1	..\Sim_0001_0001_0000.sav	7	0.1259	Normal Case	0.0737	LT_4_5_1
132.60	94.99	89.99	0	0	0	1	0	0	1	..\Sim_0001_0001_0000.sav	8	0.1261	Normal Case	0.0740	LT_4_5_1
131.19	95.70	90.70	0	0	0	1	0	0	1	..\Sim_0001_0001_0000.sav	9	0.1262	Normal Case	0.0742	LT_4_5_1
129.79	96.41	91.41	0	0	0	1	0	0	1	..\Sim_0001_0001_0000.sav	10	0.1264	Normal Case	0.0744	LT_4_5_1

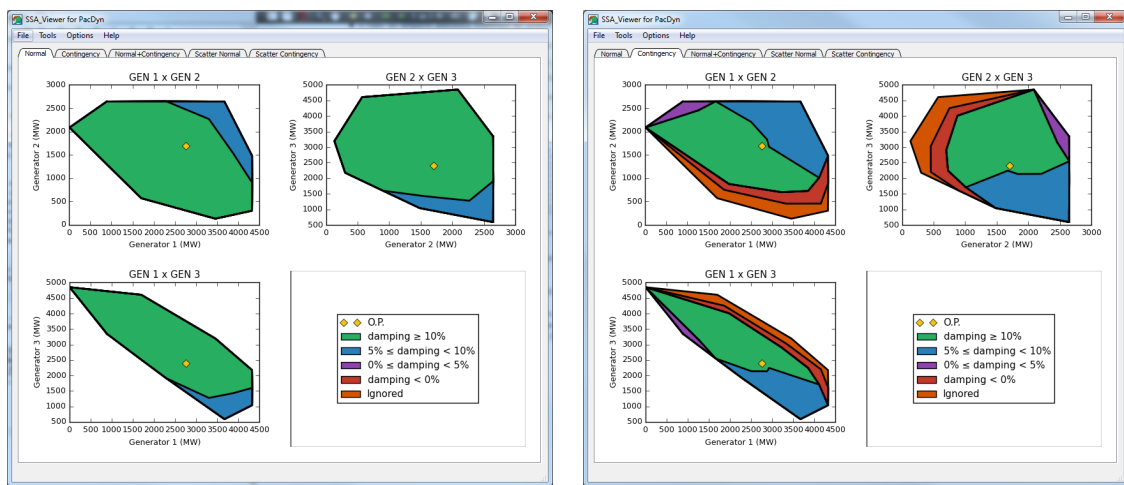
Figura 3.12: Exemplo de trecho de um arquivo .ssa

SSA_Viewer

O VisorChart, embora utilizado na visualização do VSA/DSA, não apresentava todas as características que se julgou serem necessárias para uma visualização dos nomogramas; além de não estar preparado para o tipo de região que seria gerada pela análise de amortecimento.

Motivado também pela indisponibilidade do código fonte do VisorChart, desenvolveu-se um software em Python que é responsável para mostrar os resultados na forma de nomogramas semelhantes ao do VSA/DSA com VisorChart.

Na fig. 3.13, fez-se a avaliação do SSA de um determinado caso via PacDyn, com os resultados em contingência modificado para ilustrar as regiões possíveis.

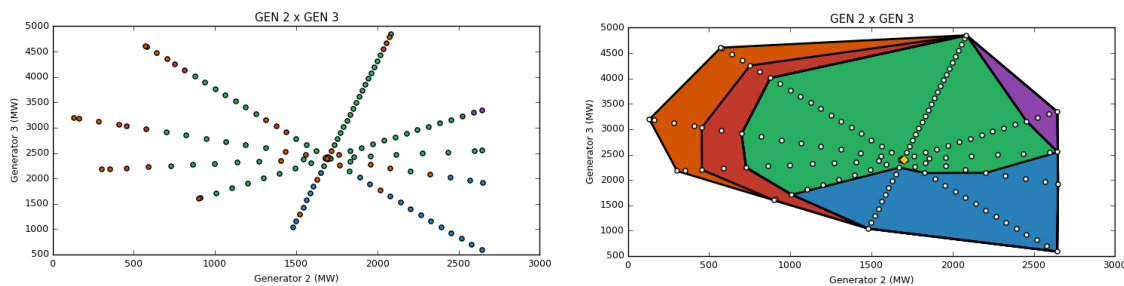


(a) SSA para os pontos base

(b) SSA para os pontos em contingência

Figura 3.13: Nomograma exemplo de SSA

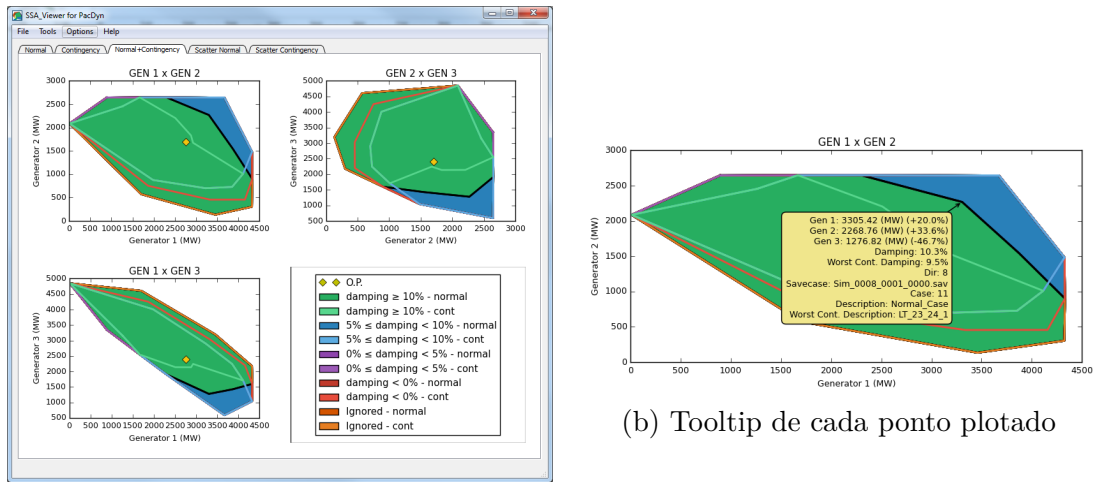
O SSA_Viewer apresenta alguns recursos de visualização, tais como: plotagem via *scatter* (fig. 3.14a); guia de *scatter* branco sobre os nomogramas (fig. 3.14b); nomograma com informação concatenada de caso base e caso em contingência (fig. 3.15a). Além disso, algumas informações a mais são dadas por *tooltip* em cada ponto plotado (fig. 3.15b).



(a) SSA no modo *scatter*

(b) SSA com guia de *scatter*

Figura 3.14: Recurso *scatter* para auxílio da leitura dos nomogramas



(a) SSA concatenado com os pontos do caso base e em contingência

(b) Tooltip de cada ponto plotado

Figura 3.15: Recursos de visualização complementares do SSA_Viewer

Note que no caso de um nomograma gerado com amortecimento estimado pelo Anatem, a informação para “Caso Base” não existirá; pela natureza da ferramenta VSA/DSA, o Anatem contribuirá com informações de contingências apenas.

Embora seja um código Python, utilizou-se alguns pacotes de maneira a criar um executável autocontido. Contudo, o mesmo é grande e razoavelmente lento para iniciar. Desta maneira, futuramente, esse software deverá ser incorporado ao programa PlotCepel, utilizado para plotagens oriundas do Anarede, Anatem e PacDyn.

3.4 Região de Segurança com Estimação do Amortecimento do Sistema

Havendo todas as ferramentas computacionais necessárias para o traçado dos nomogramas de amortecimento sido apresentadas, pode-se então aplicar tais ferramentas a alguns casos, como exemplo ilustrativo da ferramenta.

Considerou-se dois sistemas: o primeiro é um caso exemplo “9 Barras” que acompanha a instalação do Anarede, utilizado como caso-exemplo para a demonstração da ferramenta de VSA/DSA; o segundo caso é baseado no SIN, mais especificamente um sistema equivalente e modificado da região Sudeste, obtido através do ambiente de testes da plataforma SAGE (Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia)[48]. Este segundo caso foi escolhido por apresentar a ferramenta de SSA do PacDyn[3].

Para ambos os casos, serão mostrados os resultados encontrados tanto pelo SSA do PacDyn quanto os nomogramas de amortecimento encontrados pelo Anatem através do método ERA (Anatem/ERA).

3.4.1 Exemplo 9 Barras

O caso “9 Barras” utilizado para o traçado do nomograma de amortecimento é o mesmo sistema da fig. 3.1. Para este caso, monitorando-se as três máquinas e utilizando os parâmetros de varredura da solução VSA/DSA que já estão contidos no arquivo .pwf original, o nomograma de amortecimento encontrado pelo Anatem/ERA para o par $G2 \times G3$ se encontra na fig. 3.16:

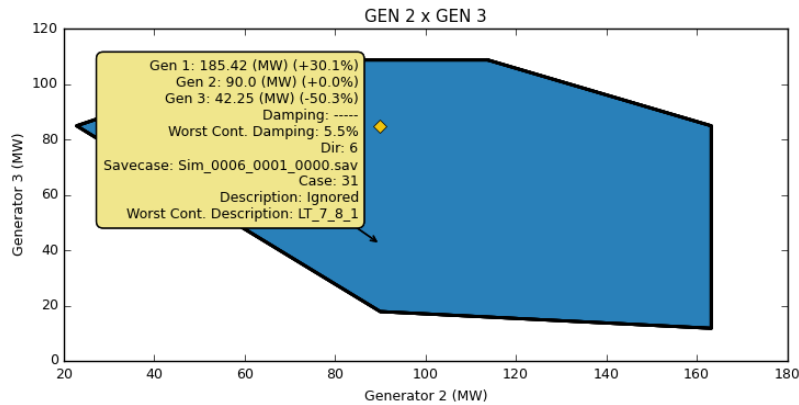


Figura 3.16: Nomograma para $G2 \times G3$ do caso “9 Barras”

Como para o caso em questão, o amortecimento se mostrou dentro de uma mesma faixa de valores, (e o mesmo acontece para o nomograma gerado pelo PacDyn), gerou-se um outro gráfico comparativo entre o amortecimento estimado pelo Anatem e o amortecimento encontrado pelo PacDyn (via QR). Este resultado se encontra na fig. 3.17, onde cada linha tracejada indica a separação entre casos de direções distintas:

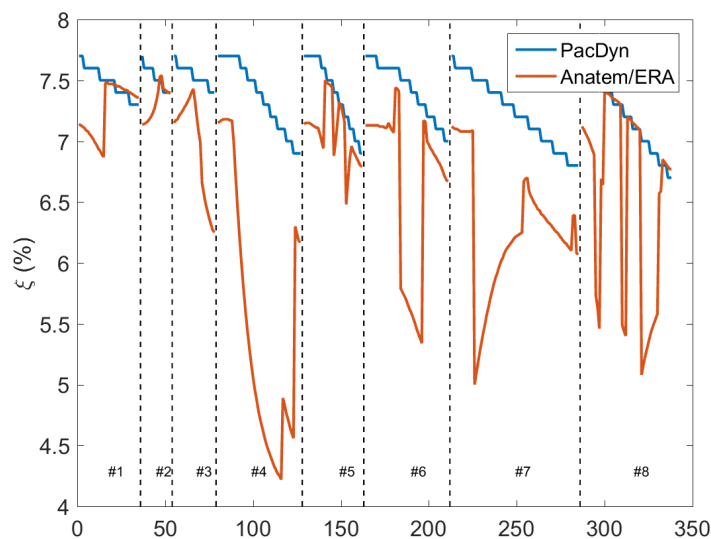


Figura 3.17: Comparação dos amortecimentos mínimos encontrados pelo PacDyn e pelo Anatem

O resultado obtido para este caso indica que a realização encontrada pelo método ERA, sem a intervenção do usuário na escolha de parâmetros a cada caso, se mostrou suficientemente próxima dos valores encontrados pelo PacDyn ($\varepsilon_\xi = 0.8002pp$). Em alguns casos (como casos da direção 8), os valores encontrados pelos dois programas se aproximam bastante. Em outros momentos (como os das direções 5 e na própria direção 8), há certa inconstância entre casos consecutivos, indicando uma possível escolha não apropriada de parâmetros de $\varepsilon_{\text{threshold}}$, $\gamma_{\text{threshold}}$, T_s ou até mesmo o instante em que se iniciou a captura. Os parâmetros do método que foram utilizados neste caso se encontram na tabela tabela 3.8:

Tabela 3.8: Parâmetros utilizados para o método ERA no caso “9 Barras”

T_s (ms)	$\varepsilon_{\text{threshold}}$	$\gamma_{\text{threshold}}$	f_{min} (Hz)	f_{max} (Hz)
100	1.0e-4	0.9900	0.1000	30.000

Deve-se ter sempre em mente que a resposta do Anatem é a resposta de um sistema não-linear, assim, era esperado que resultados encontrados pelos dois programas diferissem. Por exemplo, dependendo do ponto de operação, a inicialização dos controles pode indicar que determinado trecho da malha de controles está limitada por algum bloco. Para o Pacdyn, a saída desse bloco será invariante no tempo. Para o Anatem, isso poderá não ser verdade, já que a amplitude das oscilações e dos sinais pode ser tal que a entrada do bloco em questão pode não mais estar acima ou abaixo dos limites especificados, durante trechos da simulação.

Considerando que o objetivo do método é encontrar os nomogramas de amortecimento, os erros individuais encontrados ponto-a-ponto tendem a ser mitigados. Isto se dará uma vez que as regiões de segurança são definidas em relação a uma faixa de valores cujo intervalo é superior ao erro encontrado.

3.4.2 Exemplo Sistema Interligado Nacional

O caso do Sistema Interligado Nacional utilizado como exemplo é um caso oriundo do sistema SAGE, equivalentado, contendo 65 barras e 35 máquinas (referentes a 6 usinas equivalentes). O caso foi ajustado de maneira que o caso base tivesse um amortecimento mínimo maior que 10%, para que fosse garantida a existência da região de segurança “verde” ($\xi_{\text{sis}} > 10\%$). Para este caso em questão, são testadas duas contingências.

Este caso é o mesmo que foi utilizado na apresentação da ferramenta de SSA do PacDyn[3], mas os parâmetros de varredura da região são diferentes: utilizou-se um passo maior e apenas 10 direções.

O PacDyn apresenta dois métodos para a determinação da região de segurança

a pequenos sinais: QR e DPSE. O método QR encontra todos os modos do sistema, mas exige maior esforço computacional; o método DPSE é mais rápido, contudo a convergência se dá de acordo com a dominância dos polos[22]. Deverá ser considerado como resultado de referência aquele entregue pelo método QR.

As figs. 3.18 a 3.20 apresentam respectivamente os nomogramas de amortecimento encontrados para o caso normal, caso em contingência e o nomograma com informação concatenada do caso normal e em contingência.

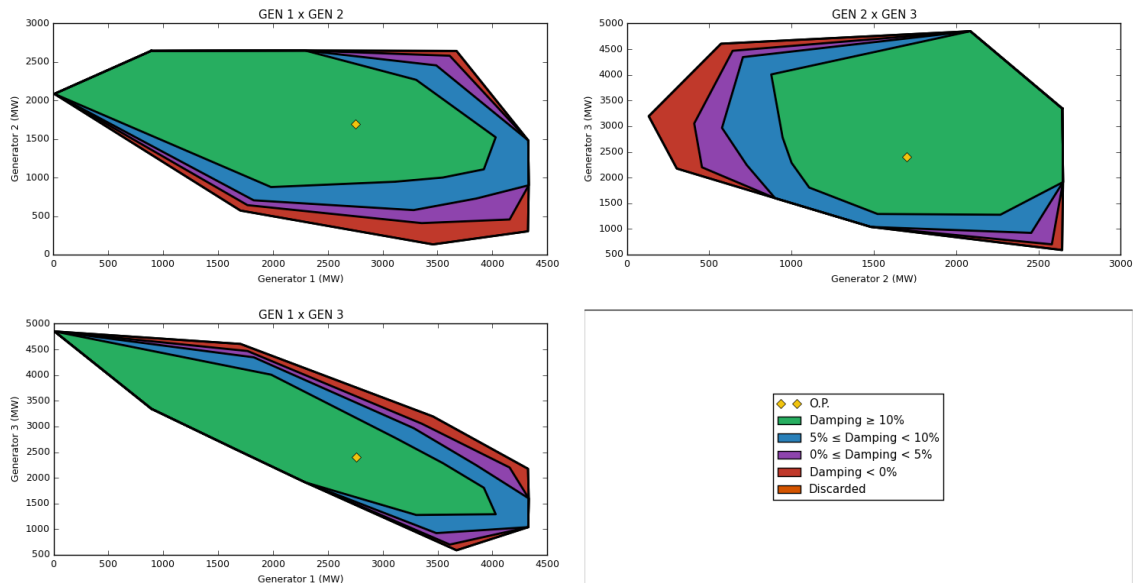


Figura 3.18: Nomograma de amortecimento para o caso SAGE Equivalente - sistema íntegro

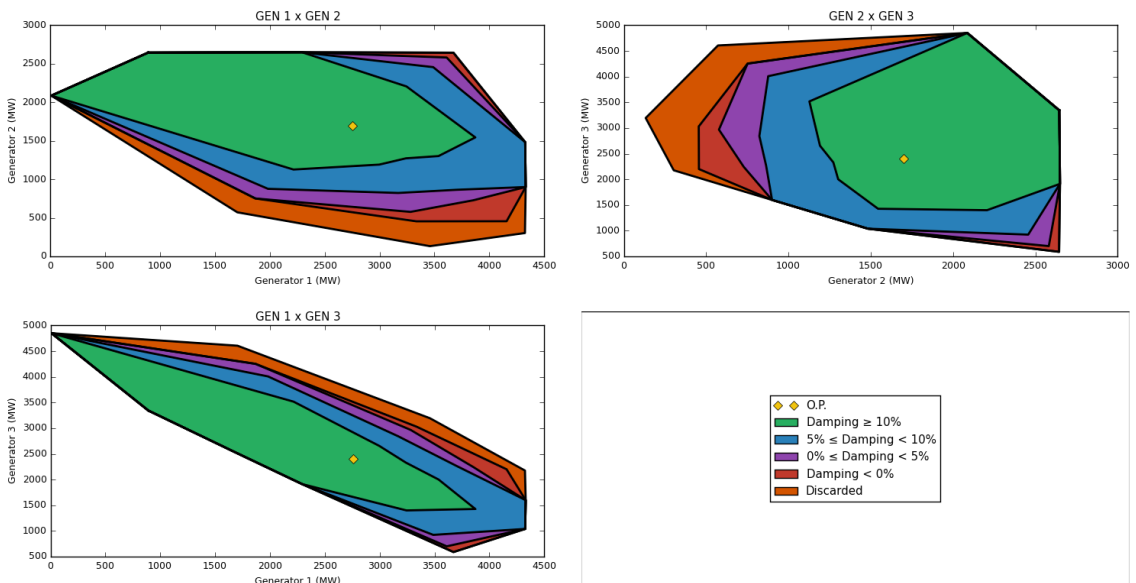


Figura 3.19: Nomograma de amortecimento para o caso SAGE Equivalente - caso em contingência

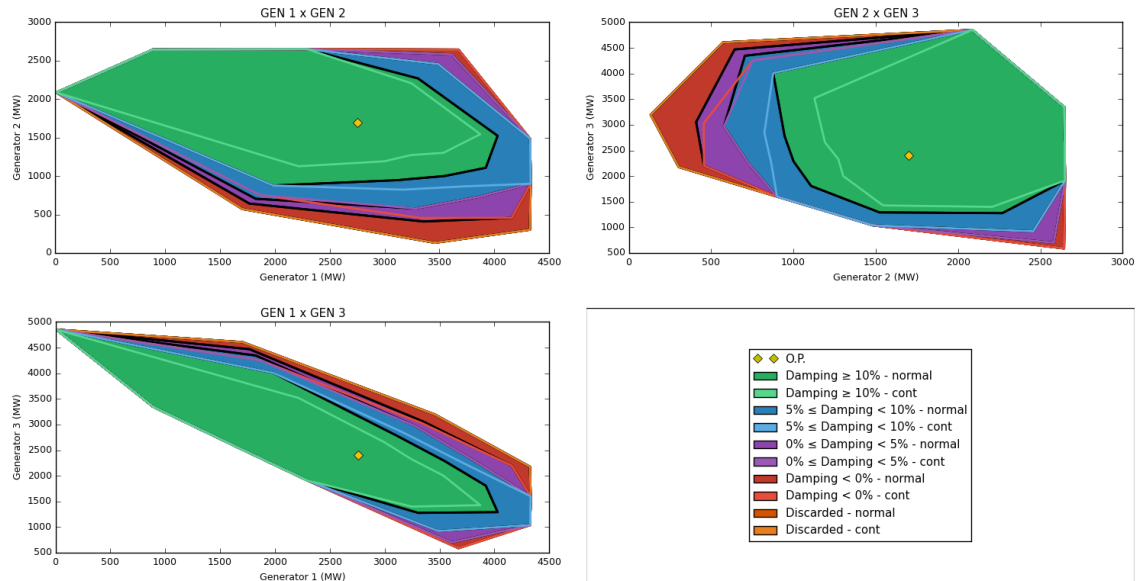


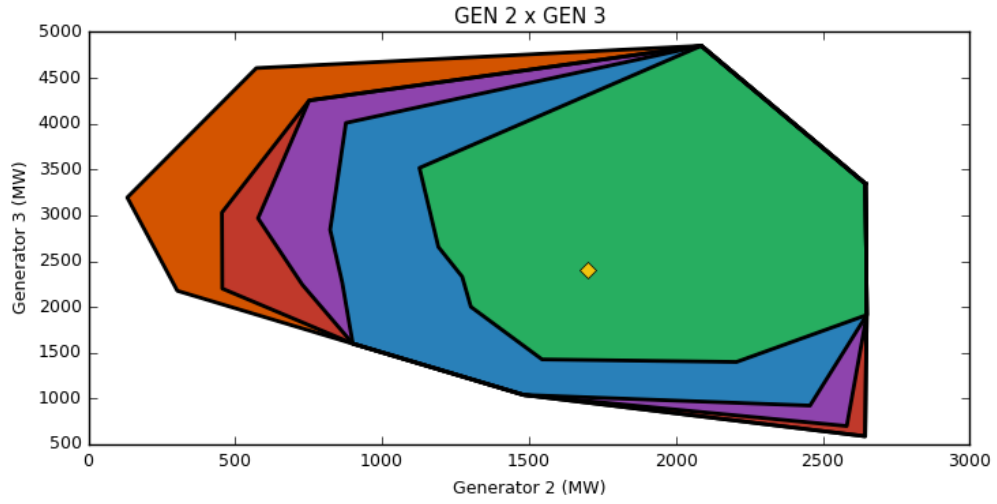
Figura 3.20: Nomograma de amortecimento para o caso SAGE Equivalente - sistema íntegro e caso em contingência

Para o caso em questão, é possível observar que o ponto de operação está situado na região mais segura, tanto para o sistema íntegro quanto em contingência. Não apenas isso, mas o ponto de operação se encontra com razoável margem dos limites desta região.

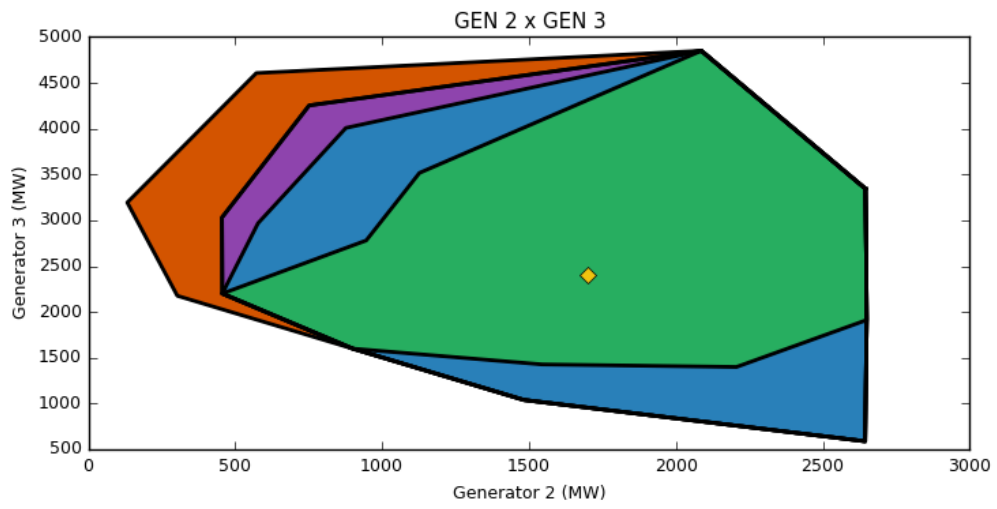
Pode-se observar também o efeito das contingências sobre o caso íntegro (fig. 3.20). Para as contingências selecionadas, as regiões de amortecimento foram “encurtadas” indicando uma menor margem de atuação do sistema para um mesmo parâmetro de qualidade de amortecimento.

Na fig. 3.21, mostra-se a diferença dos métodos QR, DPSE e ERA do Anatem para a determinação das regiões de amortecimento, considerando um nomograma particular (o par canônico $G2 \times G3$). Naturalmente, esses nomogramas dizem respeito ao sistema em contingência.

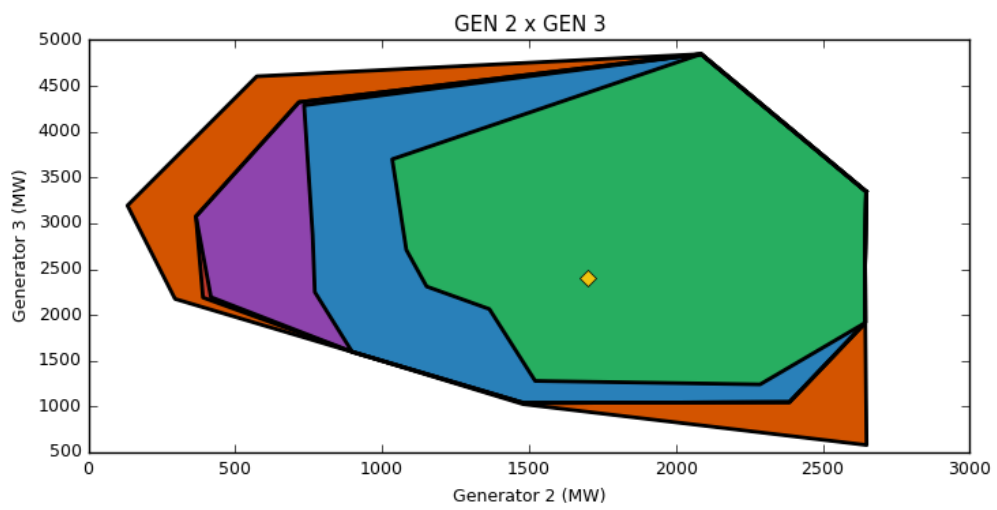
Comparando-se o método QR com o DPSE, é possível notar que o método DPSE apresentou resultados mais otimistas, aumentando as suas regiões mais seguras em detrimento das menos seguras. Tal resultado é esperado: o método DPSE converge para alguns modos do sistema apenas, naturalmente esses modos terão amortecimento iguais ou maiores que o pior amortecimento encontrado pelo método QR. Como o método DPSE depende da definição de funções de transferência, pode-se também atribuir a diferença de resultados entre o DPSE e a QR a uma definição indevida ou incompleta dessas funções de transferência utilizadas.



(a) Método QR



(b) Método DPSE



(c) Método ERA

Figura 3.21: Nomograma de amortecimento para o par $G2 \times G3$ e em contingência

Comparando-se o método QR com o ERA do Anatem, tem-se que as regiões encontradas por ambos os métodos se assemelham, diferindo na região magenta, onde o método ERA não foi capaz de encontrar os modos instáveis do método QR. Para a produção destas regiões de segurança, o método ERA fez uso dos mesmos parâmetros do caso “9 Barras” contidos na tabela 3.8.

Embora as regiões encontradas pelos três métodos são visualmente próximas, é interessante saber o quão próximos os valores de amortecimento mínimo de fato estão. Comparando-se o DPSE e o ERA do Anatem com a resposta QR, têm-se as figs. 3.22 e 3.23, onde o amortecimento mínimo encontrado em cada caso é comparado entre os algoritmos.

De acordo com o comentado anteriormente, o DPSE converge para modos que terão amortecimento mínimo igual ou superior ao dos modos encontrados pela QR. Neste sentido, o método DPSE pode entregar resultados ruins ao não considerar algum modo; apesar de convergir para modos necessariamente do sistema.

Já o método ERA, por ser um método que tenta encontrar uma realização, não apresenta a característica da garantia da convergência para modos de fato do sistema. Isto pode ser observado na fig. 3.23: para muitos pontos, o amortecimento mínimo encontrado com o ERA coincide por inspeção com o amortecimento mínimo encontrado pela QR, contudo, em outros pontos, o ERA encontra um amortecimento pior que a QR. Ainda que em alguns pontos haja uma diferença considerável entre os métodos, a acurácia média do método ERA se mostrou elevada ($\varepsilon_{\xi} = 0.5974pp$).

Do ponto de vista de segurança, observou-se que resultado entregue pelo método aproximado tende a ser pior (no sentido de mais grave) que o método preciso (QR). Pode-se dizer, portanto, que as regiões de segurança que forem delimitadas **tenderão** a ser **mais conservativas**; caso oposto do método DPSE.

Existe ainda uma heurística presente no método ERA sobre a seleção de modos: o algoritmo implementado busca considerar apenas modos eletromecânicos (tentando descartar modos com frequência elevada e modos que sejam “zero”); assim, dependendo do ajuste desses valores, modos do sistema podem não estar sendo considerados na verificação do mínimo.

É preciso também comentar que há alguma incoerência entre o gráfico da fig. 3.23 e o nomograma da fig. 3.21c. Tal incoerência se deve ao fato do nomograma gerado pelo método ERA possuir muitos mais pontos no plano $G2 \times G3$ e em função disto, foi preciso criar um algoritmo que fizesse o mapeamento dos pontos de um nomograma no outro; assim, pontos utilizados para o traçado do nomograma podem não estar presentes no gráfico da fig. 3.23.

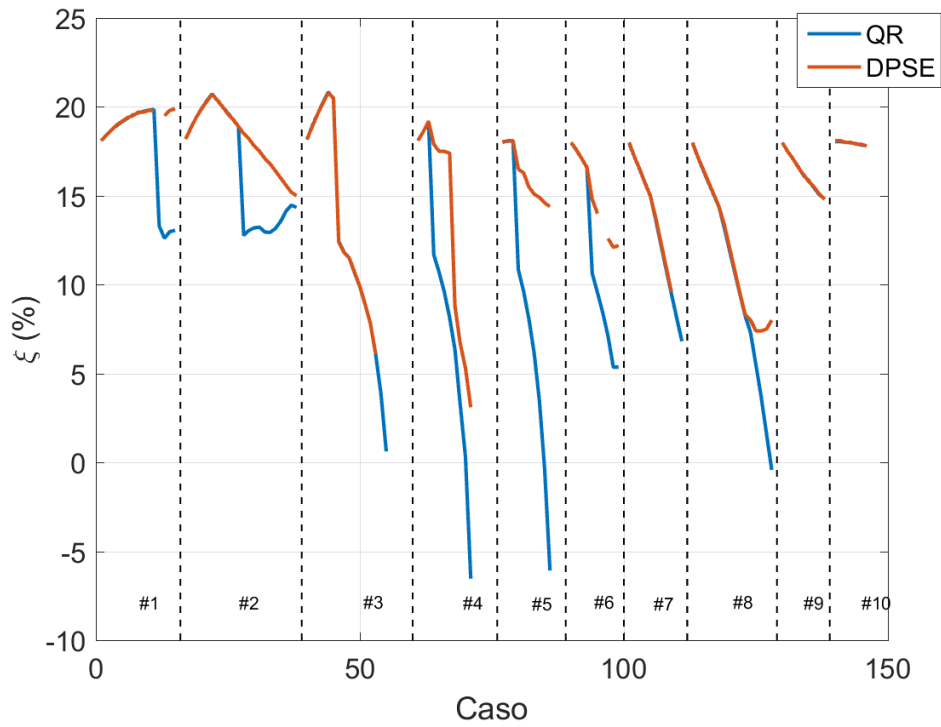


Figura 3.22: Comparação dos amortecimentos mínimos encontrados pelo método QR e pelo método DPSE

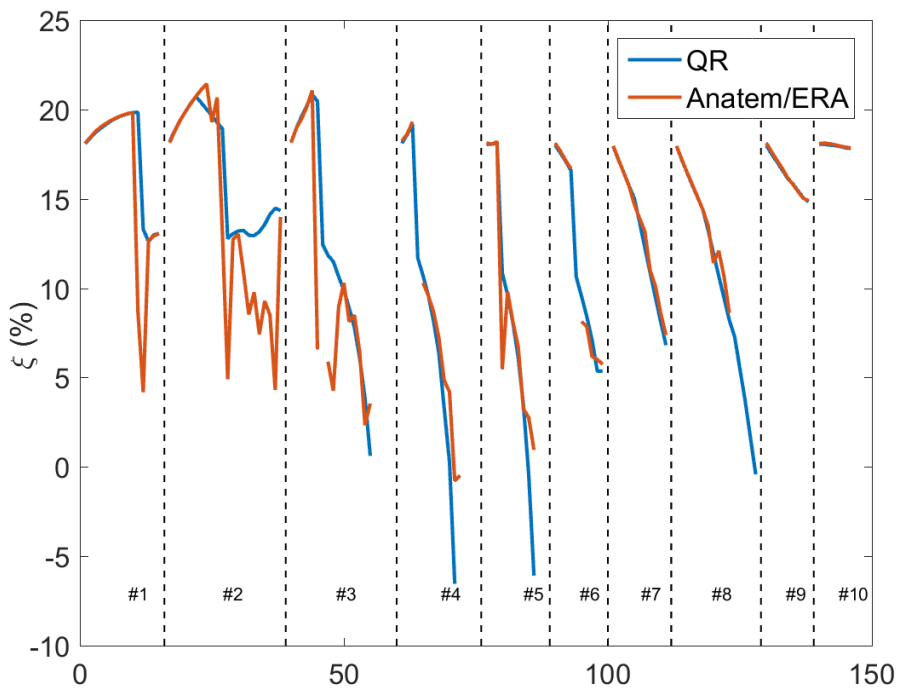


Figura 3.23: Comparação dos amortecimentos mínimos encontrados pelo método QR e pelo método ERA no Anatem

3.5 Conclusões Parciais

Em relação à estrutura do SSA do Anatem, fazer uso das mesmas estruturas que o VSA/DSA usa mostrou-se vantajoso: aproveitando-se das estruturas de mapeamento e paralelização já existentes. A determinação de uma nova região de segurança (a de amortecimento) a um custo computacional reduzido se mostra uma ferramenta bastante poderosa. Para o usuário, há pouca interação necessária além do que já se exige na ferramenta de VSA/DSA.

O método ERA se mostrou um método bastante robusto, capaz de encontrar o modo menos amortecido em boa parte dos casos (no caso SAGE equivalente). Para um mesmo conjunto de parâmetros, encontrou-se com melhor precisão o modo menos amortecido no caso do SAGE Equivalente que no 9 Barras. Este tipo de situação leva a crer que existe um ajuste nesses parâmetros que pode ser realizado a fim de melhorar a resposta do método, justificando uma investigação futura acerca do assunto.

Capítulo 4

Região de Segurança via Fluxo de Potência Continuado

Neste capítulo será feita a proposição de abordagem da segurança do sistema baseando-se na ferramenta de Fluxo de Potência Continuado (FPC); acrescentando a informação de variação de carga à análise de segurança realizadas pelo Anarede e Anatem no âmbito do VSA/DSA. Esta nova abordagem do método do FPC será referenciada como PVRS (Curva PV com Região de Segurança).

4.1 Proposta

Na ferramenta de VSA/DSA presente no Anarede e Anatem¹, busca-se definir a região do sistema em função da não-violação de certas grandezas (tensão e fluxo, principalmente) verificada a partir do redespacho do sistema em torno de determinado ponto de operação, baseando-se em certa regra de redistribuição. Para tanto, a carga do sistema é considerada constante.

Tal abordagem é particularmente útil quando se deseja explorar, por exemplo, como que alterando a geração de certas usinas o sistema tende a uma situação de violação ou afasta-se da mesma. Contudo, não oferece um sentimento do que acontece com o sistema no próximo instante de tempo em que a carga variar, aumentando ou diminuindo; ou então, o quanto essa carga pode aumentar ou diminuir até que seja verificada a violação de algum critério.

Tradicionalmente, utiliza-se o fluxo de potência continuado como ferramenta para avaliar a margem de crescimento de carga (dada uma proporção) até o ponto crítico[13], a partir do qual o sistema se torna instável[49]. Pode-se estender sua metodologia aplicando-se como critério de parada não a obtenção do ponto crítico, mas sim quando alguma inequação de segurança do tipo $\underline{f}(\underline{x}) \leq \underline{0}$ se torna falsa.

¹Para todos os efeitos, essa ferramenta se referirá aos nomogramas de segurança

Tal extensão já se encontra disponível no Anarede.

Pode-se combinar os conceitos do FPC com a análise de contingências[50]. Nesta situação, deseja-se obter os diversos casos na trajetória até atingir limite máximo de carregamento (onde se atinge o ponto crítico ou se viola alguma restrição), considerando tanto o caso base quanto o caso nas contingências informadas.

Torna-se, portanto, evidente a vantagem de se combinar diferentes recursos presentes em uma análise de fluxo de potência, a fim de se formar uma ferramenta capaz de avaliar o estado do sistema.

Por fim, este trabalho propõe a adição das regiões de segurança observadas nos nomogramas da ferramenta VSA/DSA no traçado da curva do fluxo de potência continuado, unindo e estendendo o conceito da restrição de segurança exigida e de uma lista de contingências (estáticas e dinâmicas) informada ao fluxo de potência continuado.

4.2 Fluxo de Potência Continuado

Os métodos convencionais para a solução do fluxo de potência (como é o caso do método de Newton-Raphson) apresentam problemas de convergência quando o sistema de transmissão aproxima-se do ponto crítico do sistema (a matriz jacobiana, no caso do método de Newton-Raphson, torna-se singular).

Pode ser do interesse do analista a obtenção de uma solução do fluxo de potência próxima ao ponto crítico (e mesmo além do ponto crítico). Nessas condições, é preciso lançar mão de outro algoritmo que apresente melhor convergência.

Um dos métodos mais conhecidos utilizados para resolver o problema mencionado é o Fluxo de Potência Continuado. Este método é capaz de produzir uma sequência de soluções do problema do fluxo de potência para um dado cenário de variação de carga. O método faz uso de um esquema preditor-corretor para encontrar trajetória de soluções do sistema de equações definindo o problema do fluxo de potência, agora reformulado para incluir um parâmetro que represente a variação de carga.

A fig. 4.1 ilustra a trajetória realizada pelo algoritmo preditor-corretor.

Reformulação do Fluxo de Potência

As equações utilizadas no fluxo de potência precisam ser reformuladas de maneira a comportar a estratégia de solução do Fluxo de Potência Continuado. Inicialmente, define-se a carga do sistema como:

$$P_{\ell k} = P_{\ell k}^0 + \lambda_c [\gamma_k S \cos \psi_k] \quad (4.1)$$

$$Q_{\ell k} = Q_{\ell k}^0 + \lambda_c [\gamma_k S \sin \psi_k] \quad (4.2)$$

Sendo:

$P_{\ell k}^0$: carga ativa inicial na barra k

$Q_{\ell k}^0$: carga reativa inicial na barra k

λ_c : parâmetro de continuação

γ_k : fator de variação na barra k

ψ_k : fator de variação do fator de potência na barra k

S : valor arbitrário de potência aparente usado como referência para o escalamento do parâmetro λ_c

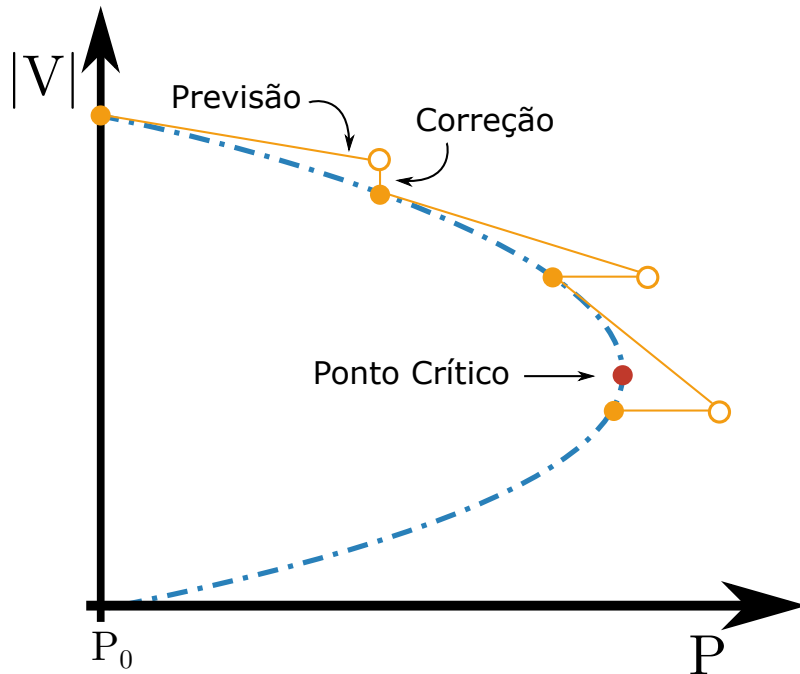


Figura 4.1: Ilustração do esquema preditor-corretor do FPC

Devido à formulação do fluxo de potência, a barra de folga ($V\Theta$) é responsável por absorver todo o desbalanço do sistema. Tratando-se de crescimento de carga, geralmente se deseja distribuir pelas unidades geradoras esse aumento. Assim, a potência ativa gerada deve ser reajustada, de acordo com a seguinte expressão:

$$P_{Gk} = P_{Gk}^0 (1 + \lambda \beta_k) \quad (4.3)$$

Sendo:

P_{Gk}^0 : geração ativa inicial na barra k

β_k : fator de variação de geração na barra k

Substitui-se a formulação do subsistema I[51] das equações de fluxo de potência por:

$$P_{Gk}^0(1 + \lambda_c \beta_k) - P_{Lk}^0 - \lambda_c [\gamma_k S \cos \psi_k] - g_{pk}(\underline{\Theta}, \underline{V}) = 0, k \in \{\text{PV}, \text{PQ}\} \quad (4.4)$$

$$Q_{Gk}^0 - Q_{Lk}^0 - \lambda_c [\gamma_k S \sin \psi_k] - g_{qk}(\underline{\Theta}, \underline{V}) = 0, k \in \{\text{PQ}\} \quad (4.5)$$

Sendo:

$$g_{pk}(\underline{\Theta}, \underline{V}) = V_k \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km})$$

$$g_{qk}(\underline{\Theta}, \underline{V}) = V_k \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km})$$

Ou, mais resumidamente:

$$f(x) = 0 \quad (4.6)$$

sendo $x = \left[\underline{\Theta}^T \quad \underline{V}^T \quad \lambda \right]^T$ e $0 \leq \lambda \leq \lambda_{\text{crítico}}$. No caso particular de $\lambda = 0$, as equações se reduzem às equações usuais do problema de fluxo de potência.

Preditor

A partir de uma solução, prevê-se a próxima solução ao se avançar na direção do vetor tangente à curva, com determinado passo. Pode-se obter o vetor tangente tomando-se a diferencial da eq. (4.6):

$$\left[f_{\Theta} \quad f_V \mid f_{\lambda} \right] \begin{bmatrix} d\underline{\Theta} \\ d\underline{V} \\ d\lambda \end{bmatrix} = 0 \quad (4.7)$$

Sendo:

$$f_{\Theta} = \frac{\partial f(x)}{\partial \underline{\Theta}}, \quad f_V = \frac{\partial f(x)}{\partial \underline{V}}, \quad f_{\lambda} = \frac{\partial f(x)}{\partial \lambda}$$

A partição $\left[f_{\Theta} \quad f_V \right]$ é a própria matriz jacobiana do método de Newton-Raphson.

Como o sistema da eq. (4.7) é subdeterminado, é preciso introduzir uma única equação adicional. Pode-se fazê-lo determinando uma das incógnitas do sistema para um valor especificado (arbitrário, mas usualmente ± 1). Nomeia-se esta variável de Parâmetro de Continuação.

Neste caso, tem-se:

$$\begin{bmatrix} f_{\Theta} & f_V & f_{\lambda} \\ & E_{1k} & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\Theta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Sendo E_{1k} o vetor elementar com mesma lei de formação da eq. (3.56).

Escolhe-se o parâmetro de continuação de tal maneira que apresente a maior taxa de variação próximo ao ponto em questão. Pode-se exemplificar:

- Próximo ao caso base: variações na carga (λ) produzem pequenas variações nas componentes de Θ e V . Escolhe-se λ , por consequência.
- Próximo ao ponto crítico: pequenas variações na carga (λ) provocam grandes variações em algumas componentes de Θ e V . Escolhe-se θ ou V com maior taxa de variação, neste caso.

Determinado o vetor tangente ao ponto em questão, a previsão da próxima solução é dada por:

$$\begin{bmatrix} \Theta^{k+1} \\ V^{k+1} \\ \lambda^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Theta^k \\ V^k \\ \lambda^k \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} d\Theta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Sendo:

k : um iterador

σ : passo a ser dado

Como inerente aos métodos numéricos do tipo preditor-corretor, caso o passo utilizado no preditor seja demasiadamente grande, a etapa de correção pode não convergir; caso seja demasiadamente pequeno, muitos pontos podem vir a ser calculados, aumentando o esforço computacional.

Corretor

A etapa de correção nada mais é que a solução do fluxo de potência para a condição de carga-geração dada ao sistema pela etapa de predição. O resultado obtido pelo preditor é, na realidade, um reajuste das condições iniciais a partir das quais o método de Newton-Raphson (por exemplo) irá ser inicializado. Desta maneira, o corretor nada mais é que a solução do seguinte sistema:

$$\begin{bmatrix} f(x) \\ x_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \eta \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Sendo:

x_k : a variável escolhida como parâmetro de continuação

η : o valor assumido para o parâmetro de continuação na etapa de previsão

4.2.1 Resumo do Algoritmo

Havendo todas as etapas sido descritas com algum grau de detalhamento, julga-se oportuno resumir os procedimentos que devem ser realizados. A fig. 4.2 apresenta um sumário do algoritmo na forma de fluxograma.

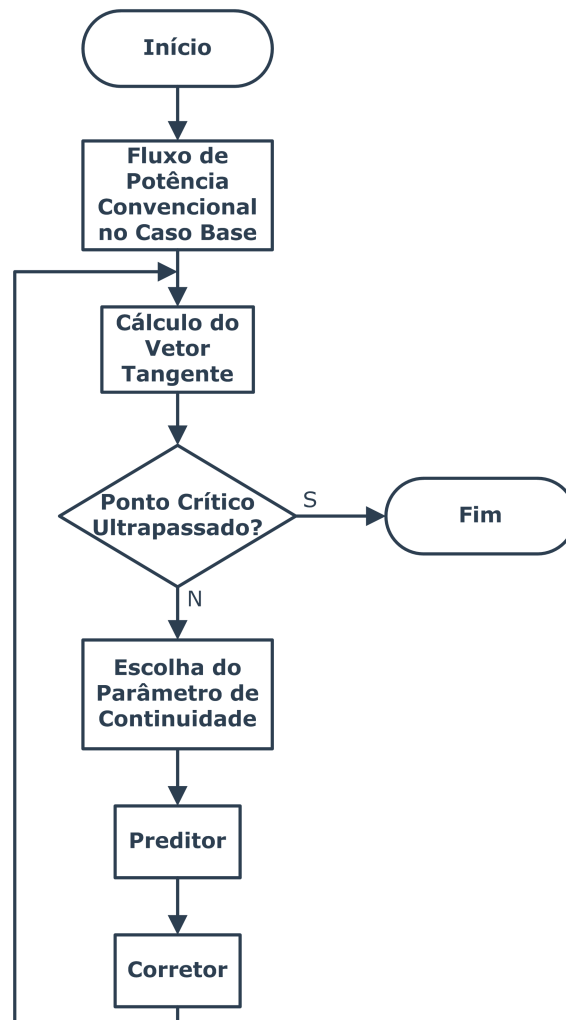


Figura 4.2: Fluxograma do algoritmo do Fluxo de Potência Continuado

4.2.2 Fluxo de Potência Continuado com Contingência

O Fluxo de Potência Continuado é um método muito útil na definição da capacidade de transmissão de um Sistema Elétrico de Potência. Com ele, é possível de se encontrar qual o limite de carregamento que o sistema suporta, além de como o perfil de tensão do sistema é afetado pelo aumento no carregamento.

Em muitas aplicações, deseja-se levantar parâmetros de qualidade ou segurança considerando diversas possibilidades ou *cenários* em que o sistema pode vir a operar[52]. Tal filosofia fundamenta o conceito da análise de contingências, onde se deseja avaliar as condições em que o sistema pode operar quando qualquer evento acontecer dentro de um conjunto previsto de possibilidades.

O Fluxo de Potência Continuado com Contingência é, pois, a aplicação do conceito da análise de contingências ao método descrito na subseção anterior. Tal abordagem permite, por exemplo, encontrar qual o máximo carregamento do sistema dado que alguma contingência pode acontecer. A fig. 4.3 ilustra o FPC com Contingência.

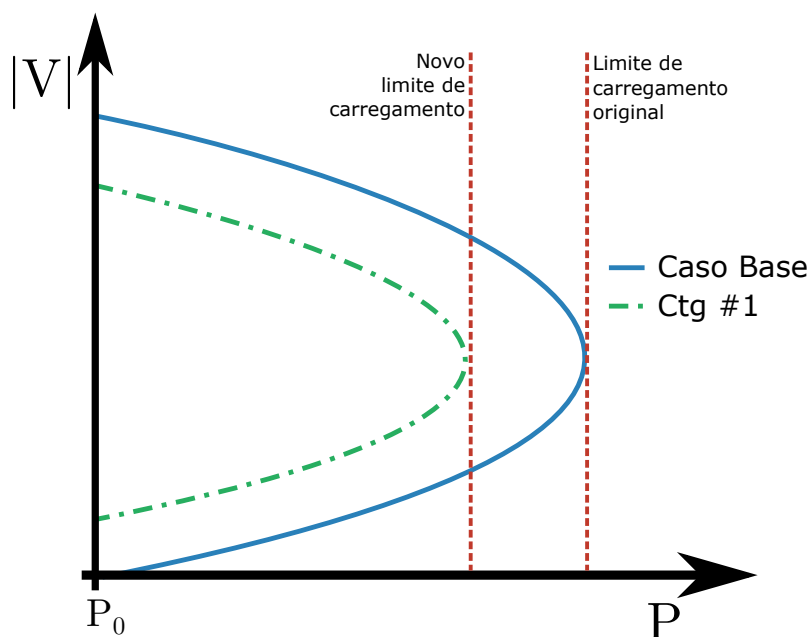


Figura 4.3: Ilustração do esquema preditor-corretor do Fluxo de Potência Continuado com Contingência

Há duas abordagens possíveis para a elaboração da curva do FPC para uma contingência: parte-se de um caso base, aplica-se uma contingência determinada e se realiza o FPC deste caso contingenciado, repetindo o procedimento para cada contingência; ou para cada ponto do corretor do FPC, aplica-se a análise de contingência.

Dentro do programa Anarede, sob a alcunha de “PV de contingência” ou PVCT[50], implementou-se um algoritmo que se baseia na segunda possibilidade.

O fluxograma da fig. 4.4 demonstra como o algoritmo do FPC é modificado de maneira a incluir a análise de contingências.

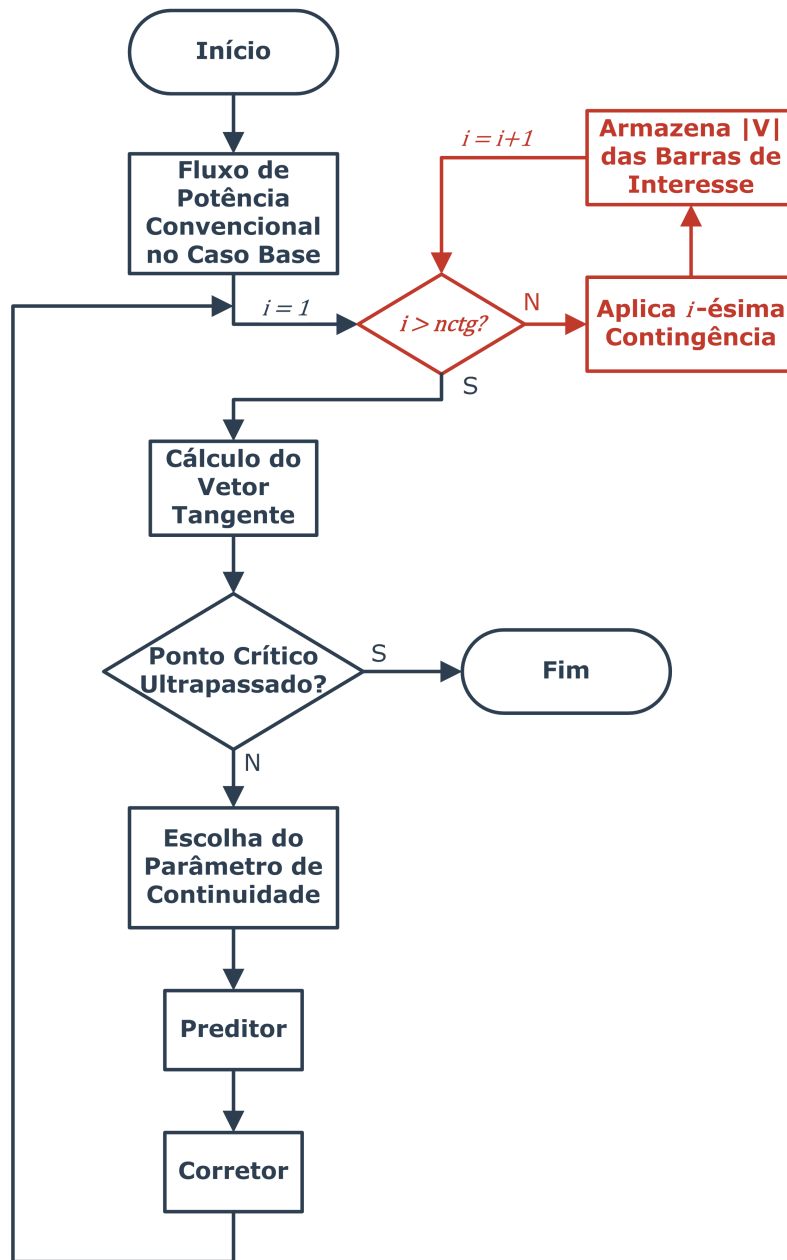


Figura 4.4: Fluxograma do algoritmo do Fluxo de Potência Continuado com Contingência

No caso do sistema degradado para uma dada contingência em particular ter alcançado o máximo carregamento, descartar-se-á para todos os pontos posteriores, a análise desta contingência em particular. Alternativamente, pode-se usar como critério de parada algum percentual de carregamento de algum circuito ou alguma violação de tensão em algum barramento ter ocorrido, para *qualquer* cenário (caso base ou em contingência).

4.2.3 Fluxo de Potência Continuado com Informação de Segurança

Considerando a ferramenta de VSA/DSA do Anarede, no qual o algoritmo consiste em caminhar em determinada direção de redespacho de geração, avaliando em cada ponto a segurança do sistema em relação à tensão, fluxo e geração de potência reativa; estende-se esse conceito ao Fluxo de Potência Continuado.

Tal proposição é natural, pois, uma vez que ambas as ferramentas, em sua natureza, gerem pontos de operação oriundos de determinado caso base, aplicando-se a análise de contingências em cada um desses pontos de operação, tem-se uma miríade de pontos que podem ser analisados sob o ponto de vista da segurança.

Considerado as informações de segurança da ferramenta VSA/DSA, pode-se, a cada ponto e para cada contingência, avaliar se determinada grandeza está respeitando algum valor de monitoração ou não. Considera-se a informação de segurança, para dado patamar de carga, como sendo a *pior* dentre os casos analisados. Isto é, caso determinada contingência apresente violação de tensão e outra apresente apenas violação de carregamento, considera-se para aquele ponto que tanto tensão quanto carregamento não são respeitados.

Obtendo-se para cada um desses patamares as informações relativas de cada critério de segurança, pode-se agregar esses resultados tanto de uma maneira textual, na forma de tabelas, quanto de uma maneira gráfica. Como o FPC tem como resposta uma curva, comumente referenciada como “Curva PV”, na qual se mostra a relação do carregamento do sistema com o nível de tensão de determinada barra, propôs-se adicionar a esta curva as informações de segurança.

Naturalmente, levanta-se a questão de com quais recursos visuais tal informação pode ser apresentada. Para efeitos simplificadores, considere apenas a violação de tensão como algo possível em um sistema. É razoável supor que a ocorrência desta violação ou não será dada mais comumente em *regiões* (ou intervalos) em contraposição a pontos específicos. Isto é, espera-se uma degradação contínua da amplitude de tensão.

Tal proposição não é necessariamente verdadeira, considerando que há controles no sistema com tolerância para atuarem, como *tap* de transformadores. Nessas condições, é possível que para dado patamar de carregamento haja violação em alguma barra e no patamar seguinte, algum transformador reajuste seu *tap* e a violação desapareça.

Pode-se, então, definir como a região livre de violação de tensão toda aquela região que, a partir do ponto base, não apresente violação. Segundo essa definição, todos os patamares seguintes ao primeiro que apresentarem violação de tensão são marcados como violados, ainda que individualmente não o sejam. Tal situação é

igualmente representada na ferramenta VSA/DSA do Anarede.

Representação Gráfica

Considerando essa definição de segurança para a Curva PV, tem-se que a região segura (do ponto de vista de tensão) será um conjunto de pontos contíguos, que podem ser agrupados segundo um critério de *cor* ou *forma*. Uma possível forma de visualização estaria na marcação da curva de tensão da barra quanto a natureza da violação, no ponto em que ocorresse pela primeira vez. Isso pode se dar tanto com um marcador quanto com a mudança de cor da curva. A fig. 4.5 ilustra essa visualização.

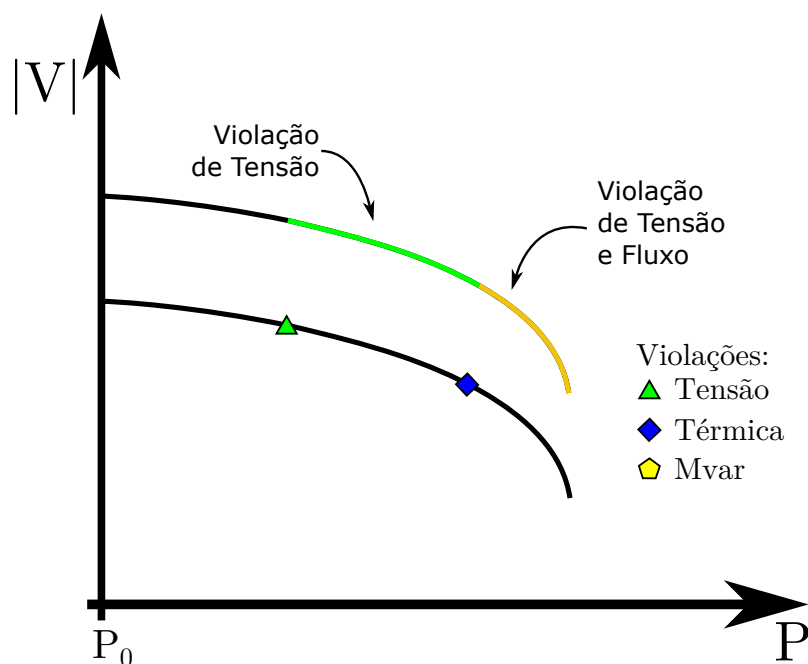


Figura 4.5: Ilustração da proposta de Curva PV com Informação de Segurança

Facilmente, pode-se concluir que a informação visual agregada para o caso da curva com informação de segurança via coloração é inapropriada. Num cenário em que mais de uma curva se apresente simultaneamente (o que é perfeitamente razoável de se supor), torna-se complicado a distinção entre as curvas justamente por alterar a característica que geralmente é usada para diferenciá-las: a cor. Poderia-se utilizar uma mudança no traçado da curva (indo de contínuo para tracejado e traço-ponto, por exemplo), mas seria recorrente a confusão visual causada por tal artimanha.

Em relação aos marcadores, há tanto um problema de redundância quanto um problema de *misleading*. É redundante, pois diferentes curvas plotadas vão apresentar o mesmo marcador na mesma posição x do gráfico, quando o eixo x está normalizado e representa o incremento percentual de carga. É *misleading*, pois no caso de apenas uma curva estar plotada, pode-se gerar, no usuário desatento, a ideia

que aquela violação seria referente àquela barra e não ao sistema.

Considerando essas situações, vislumbrou-se uma marcação mais genérica e que fosse capaz de transmitir a informação de violação do sistema. Sugere-se então a marcação de linhas verticais que passam pelos pontos x onde existe a violação de tensão ou de capacidade. Como os nomogramas da ferramenta VSA/DSA apresentam também uma possibilidade de fundos referentes à quantidade de violações e outras qualidades do ponto, sugere-se aplicar mesmo conceito ao caso. A fig. 4.6 ilustra essa proposta.

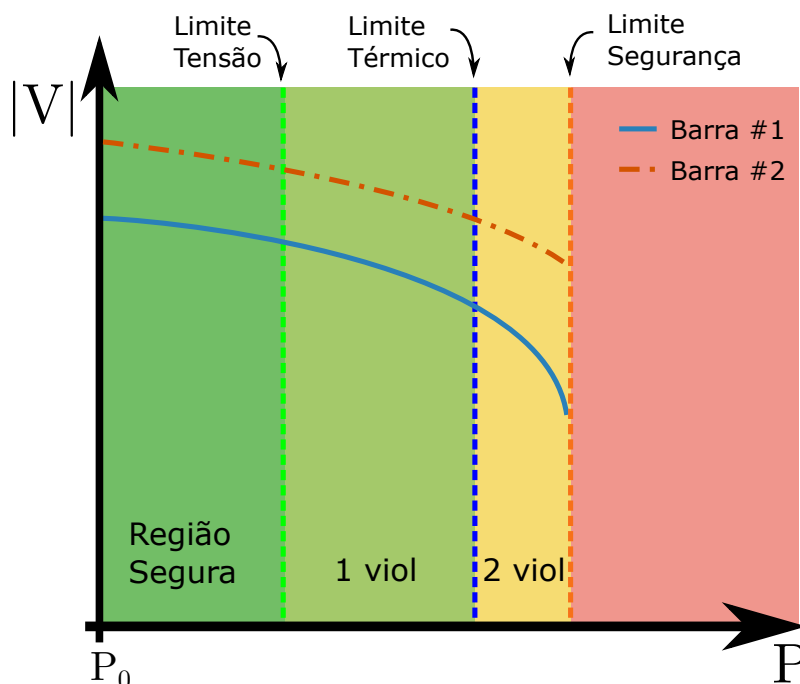


Figura 4.6: Ilustração da Curva PV com Informação de Segurança

As cores utilizadas para representar as diferentes regiões no gráfico visam a agilizar e facilitar a compreensão das informações expostas. Elas são apresentadas em *dégradé*, começando pelo verde – que psicologicamente configura continuidade e permissão –, passando pelo amarelo – atenção e concentração – e terminando em vermelho – perigo, proibição –, em consonância com a progressão das violações. Tal configuração de cores possui entendimento fácil e universal, inclusive sendo utilizada globalmente nos códigos de trânsito, salvas pequenas alterações em alguns países[53].

O sistema apresentado na fig. 4.6 é um exemplo ilustrativo de quando todas as contingências apresentam solução para os pontos do FPC. No caso mais geral, em que isso não ocorre, teríamos ainda uma nova região, em que alguns cenários convergem e outros não. Esta região é chamada pela ferramenta VSA/DSA do Anarede de **região insegura**, pois na ocorrência de alguma das contingências previstas, o sistema possivelmente entra em colapso (ultrapassado o limite de máximo carregamento do sistema). Tal situação é contemplada na fig. 4.7.

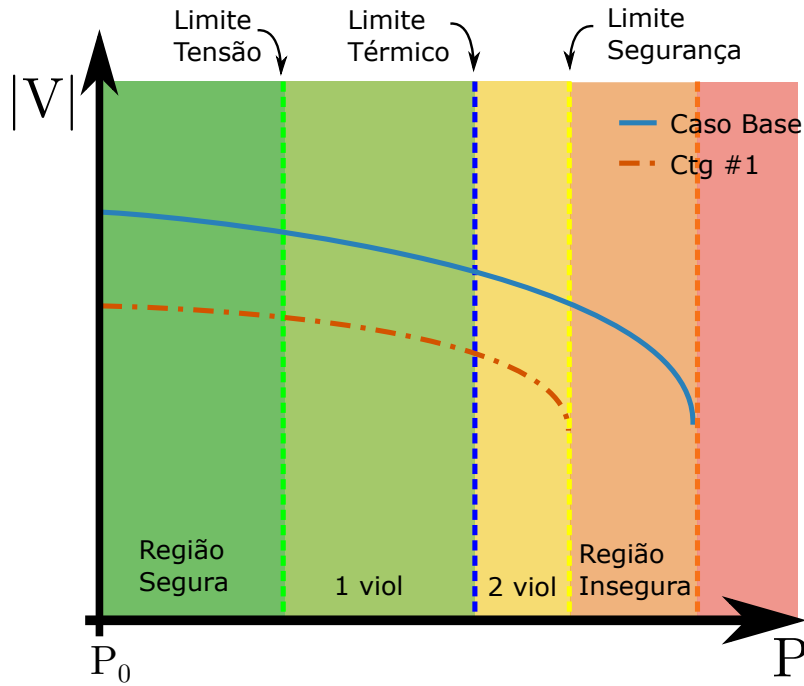


Figura 4.7: Ilustração definitiva da Curva PV com Informação de Segurança

As contingências testadas podem ser tanto estáticas quanto dinâmicas. Nesta segunda situação, a contribuição da simulação dinâmica seria a avaliação da contingência do ponto de vista dinâmico. O incremento de carga e de geração, contudo, é realizado apenas na fase da avaliação de regime permanente, à semelhança da forma como a ferramenta VSA/DSA mapeia a região a ser analisada.

Representação Gráfica para Carga com Modelo ZIP

Uma premissa geralmente adotada na concepção do FPC e em seus diagramas está na modelagem de potência constante (em relação à tensão da barra) para a carga. Nesta representação, a curva que define o máximo carregamento do sistema é uma semi-reta vertical. Desta maneira, estende-se para os demais limites a informação visual de uma semi-reta vertical, sendo que qualquer ponto **à direita** desta semi-reta implicaria em dizer que o ponto está violando o critério considerado.

Contudo, para uma carga cuja potência dependa do valor da tensão, tal abordagem não é verdadeira. Normalmente, essas cargas dependentes da tensão (ou funcionais) costumam ser modeladas, de maneira estática, por uma das duas equações a seguir (a parcela de carga reativa segue de maneira análoga):

$$P_{\text{zip}} = P_0 \left(a + b \frac{V}{V_0} + c \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right) \quad (4.11)$$

$$P_{\text{exp}} = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\alpha \quad (4.12)$$

Para tais cargas, o comportamento do parâmetro para a bifurcação existente na curva PV é alterado: o ponto crítico do sistema não é mais o ponto de máximo carregamento. Considere o desenho esquemático da fig. 4.8. Nele, estão representados os pontos críticos da curva do caso base para dois modelos distintos: potência constante e um modelo ZIP que contém uma curva PV para um sistema cuja modelagem não seja com potência constante.

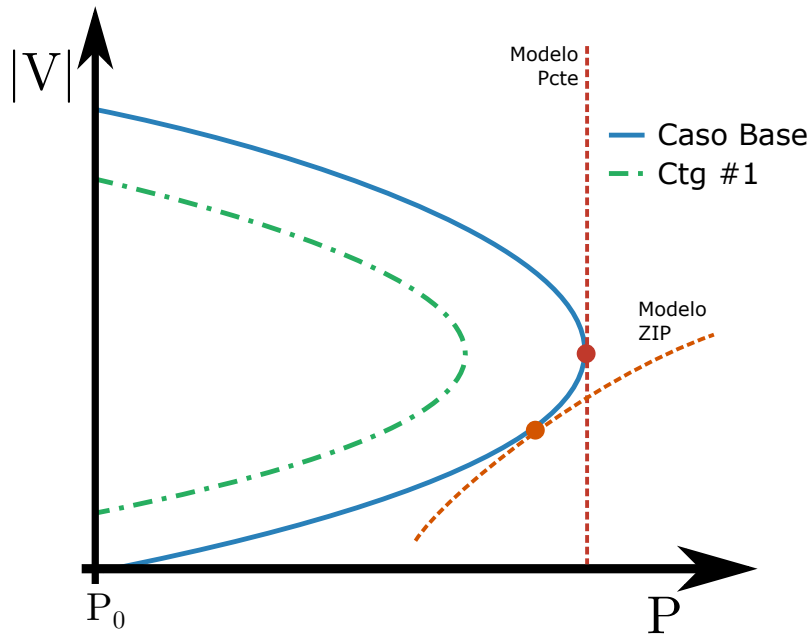


Figura 4.8: Ilustração da Curva PV com modelo ZIP

Este ponto crítico é o ponto em que os dois *equilibra* se encontram. Geometricamente, o *equilibrium* é cada um dos pontos de interseção entre as curvas características da carga e PV. No ponto crítico, o sistema deixa de apresentar dois *equilibra* (um estável e um instável), passando a apresentar apenas um único ponto ($\lambda = 0$, cuja estabilidade depende das não-linearidades do sistema)[7, 49]. Conseqüentemente, o ponto crítico é aquele em que as curvas se tangenciam. Os pontos críticos para cada curva estão marcados na própria fig. 4.8.

Considerando a forma gráfica de uma curva característica do modelo ZIP, a marcação de regiões através de semi-retas verticais, conforme feito na fig. 4.7, torna-se inapropriada. Considere a fig. 4.9, onde combinou-se uma curva PV (modelo ZIP) com as informações de segurança na formatação “potência constante”.

A partir deste gráfico, o analista poderia erroneamente concluir que haveria alguma instabilidade ou inexistência de solução no caso antes do ponto crítico. Como o ponto crítico não é explicitamente marcado no traçado da curva (até porque raramente é encontrado), o analista poderia entender que o ponto crítico do sistema seria a primeira interseção entre as duas curvas.

A melhor forma de se delimitar as regiões sem provocar dubiedade seria dese-

nhar as regiões com fronteiras cujas equações matemáticas seriam equivalentes às equações características das cargas. A fig. 4.10 ilustra essa nova formatação.

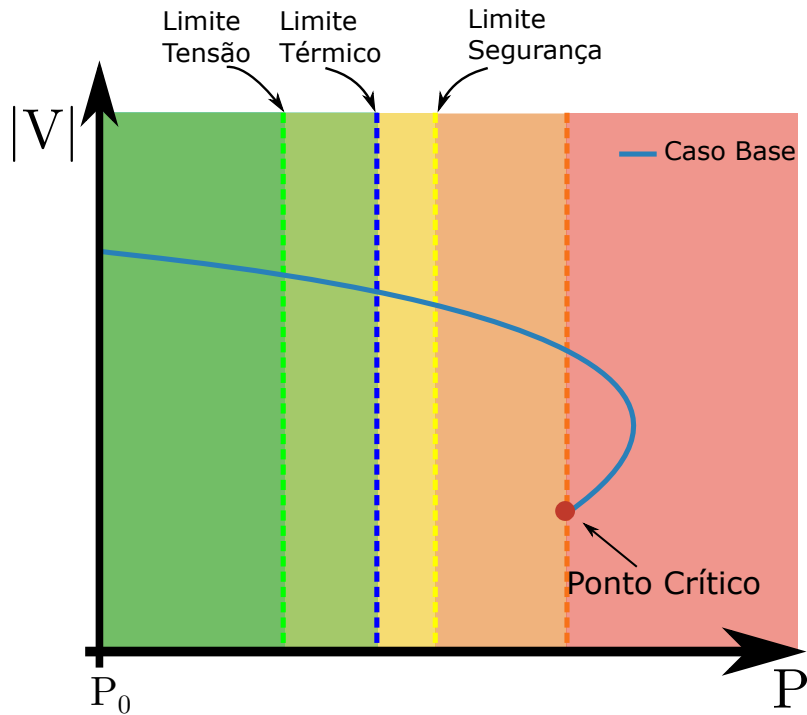


Figura 4.9: Ilustração da Curva PV com Informação de Segurança e modelo ZIP

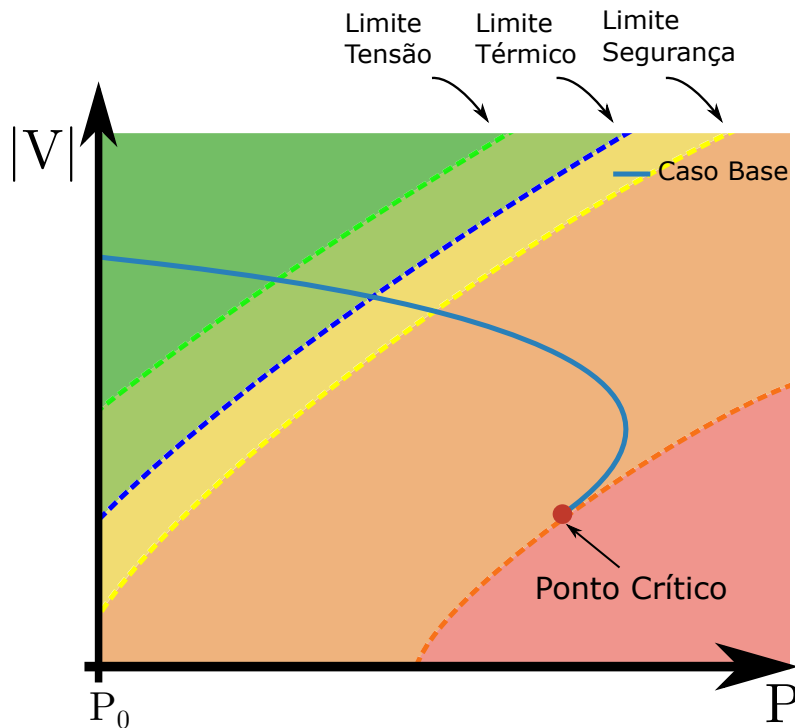


Figura 4.10: Ilustração corrigida da Curva PV com Informação de Segurança e modelo ZIP

A dúvida causada pela forma do delimitador e da curva característica da carga

(fig. 4.9) não mais se encontra na fig. 4.10. Contudo, a construção dessas regiões seria mais complexa, requerendo que vários parâmetros de plotagem fossem informados para o visualizador gráfico. Mais precisamente, seria necessário informar os parâmetros de **cada uma das barras monitoradas**. Isto se daria porque, naturalmente, cada barra teria sua própria curva característica associada e, portanto, um formato de região de segurança característico.

Observe que tal situação gera um novo problema: a visualização simultânea de duas curvas ficaria comprometida. Caso duas barras tivessem modelos ZIP diferentes e o analista quisesse verificar simultaneamente a curva dessas duas barras, dois conjuntos distintos de regiões se sobreporiam, prejudicando a visualização das condições do sistema. Além disso, quando há modelo de carga variante com a tensão, o ponto de máximo carregamento difere do ponto crítico do sistema. Em geral, o interesse no traçado do FPC reside na busca do ponto de máximo carregamento.

Considerando os pontos levantados, adotou-se, portanto o formato da fig. 4.7 como canônico para a geração das regiões de segurança, onde os limites de segurança e MW são dados pelo máximo carregamento do sistema em contingência e do sistema íntegro, respectivamente. O usuário deverá ficar atento para casos patológicos em que o ponto crítico diste significativamente do ponto de máximo carregamento.

4.3 Implementação Computacional

Havendo o funcionamento básico do Fluxo de Potência Continuado sido explicado, assim como a proposta para a demarcação das regiões de segurança, pode-se descrever a nível computacional como tais procedimentos são realizados.

O FPC é uma ferramenta disponível no Anarede[54], cujo conhecimento sobre é amplo nos usuários do programa. Na sua forma clássica, a ferramenta apresenta as funcionalidades de incremento de carga e solução do fluxo de potência com e sem o parâmetro de continuação, e com critérios diversos de redistribuição de geração. Através da Opção de Execução PVCT[50], o Anarede é capaz de aplicar contingências estáticas e levar a solução dessas contingências em consideração no relatório de monitoração de tensão e fluxo.

Portanto, ao algoritmo já presente no Anarede, resta apenas a inclusão das contingências dinâmicas e da captura da informação da segurança em cada ponto (com construção das regiões por consequência).

4.3.1 Conjunto de Dados no Anarede

O Fluxo de Potência Continuado com Informação de Segurança, sendo a extensão da ferramenta do Fluxo de Potência Continuado com Contingência, não exige que

nenhum dado novo seja inserido. Para o FPC de Contingência, informava-se os dados de incremento de carga e redistribuição da geração, assim como os dados de monitoração de tensão, fluxo e geração de reativo caso fosse do interesse do usuário monitorar tais grandezas.

Para o FPC com Informação de Segurança, contudo, tais monitorações tornam-se o cerne da simulação. É facultado ao usuário a monitoração, contudo, pois pode-se querer monitorar apenas fluxo ou tensão, individualmente.

Devido a natureza da ferramenta, seu uso é feito adicionando-se uma opção de execução ao código do FPC convencional. Exige-se, portanto, do usuário apenas duas declarações no arquivos de dados:

Opção DINC realiza a leitura dos dados de incremento de carga a serem utilizados para determinação da direção de crescimento;

Código EXIC executa a da ferramenta do FPC;

Opção PVRS ativa a determinação das regiões de segurança observadas no FPC

Outras opções não são obrigatórias, mas influenciam sobre a ferramenta, como por exemplo:

Opção MOST ativa a monitoração de tensão das barras selecionadas;

Opção MOCT ativa a monitoração de tensão de todas as barras;

Opção MOSF ativa a monitoração de fluxo dos circuitos selecionados;

Opção MOCF ativa a monitoração de fluxo de todos os circuitos;

Opção MOSG ativa a monitoração de geração de reativo das máquinas selecionadas;

Opção MOCG ativa a monitoração de geração de reativo de todas as máquinas;

Código DMTE seleciona as barras que terão a tensão monitorada quando a opção MOST estiver ativa

Código DMFL seleciona os circuitos que terão o fluxo monitorado quando a opção MOSF estiver ativa

Código DMGR seleciona as máquinas que terão a geração de reativo monitorada quando a opção MOSG estiver ativa

Opção PVCT executa contingências no FPC; do contrário, apenas o sistema íntegro será simulado

Opção JUMP inibe a execução de contingências dinâmicas (apenas etapa VSA)

Código DDIN realiza leitura de dados de arquivos dinâmicos a serem utilizados nas contingências dinâmicas (etapa DSA)

Na ferramenta da determinação da região de segurança pelo método dos nomogramas, para a execução das contingências dinâmicas, o Anarede procurava na pasta de trabalho o arquivo *devt.ctg*, que contém a lista de contingências dinâmicas a serem aplicadas, e os arquivos *stb_base.stb* e *snap_base.stb* usados para a geração dos arquivos de estabilidade de cada patamar a ser simulado. Nesses arquivos *.stb*, os caminhos dos arquivos de dados associados deveriam estar relativos a um nível superior a que estes arquivos se encontram; pois eles seriam copiados para uma pasta que se encontraria um nível abaixo do atual.

O Código de Execução DDIN foi implementado no Anarede de maneira a facilitar as etapas de DSA que são executadas pelo programa. Através desse código, informa-se um arquivo *.stb* perfeitamente funcional (pode-se mandar executar aquele *.stb* que não haverá erros) e o arquivo que contém as contingências dinâmicas, conforme a fig. 4.11. Como o código de execução espera duas linhas de dados, não há término demarcado por 99999

```
DDIN
( arquivo anatem a ser utilizado como base para os casos de cada patamar )
main_anatem.stb
( arquivo devt.ctg contendo as contingencias dinamicas do caso           )
cont_dinamica.dat
```

Figura 4.11: Exemplo da utilização do código DDIN

4.3.2 Algoritmo de Solução

O conjunto de dados que o usuário deve informar o programa já fora explicado: não sendo diferente de um conjunto de dados que já devesse ser informado ao programa para a execução do FPC: a interface do programa com o usuário é extremamente simplificada.

Do ponto de vista do algoritmo implementado (presente na fig. 4.12), pouco se difere do FPC tradicional. Naturalmente, a questão sobre reuso de código antigo é levantada em tais situações[55], uma vez que o compartilhamento com rotinas é evidente. Deve-se, portanto, levar em consideração as estruturas utilizadas e como elas se relacionam, com o devido cuidado para não contaminar rotinas que outrora haviam sido testadas e utilizadas à exaustão.

A alternativa óbvia reside na mimetização dos laços já implementados. Tal escolha é tomada quando o código original é por demasia complicado ou embolado

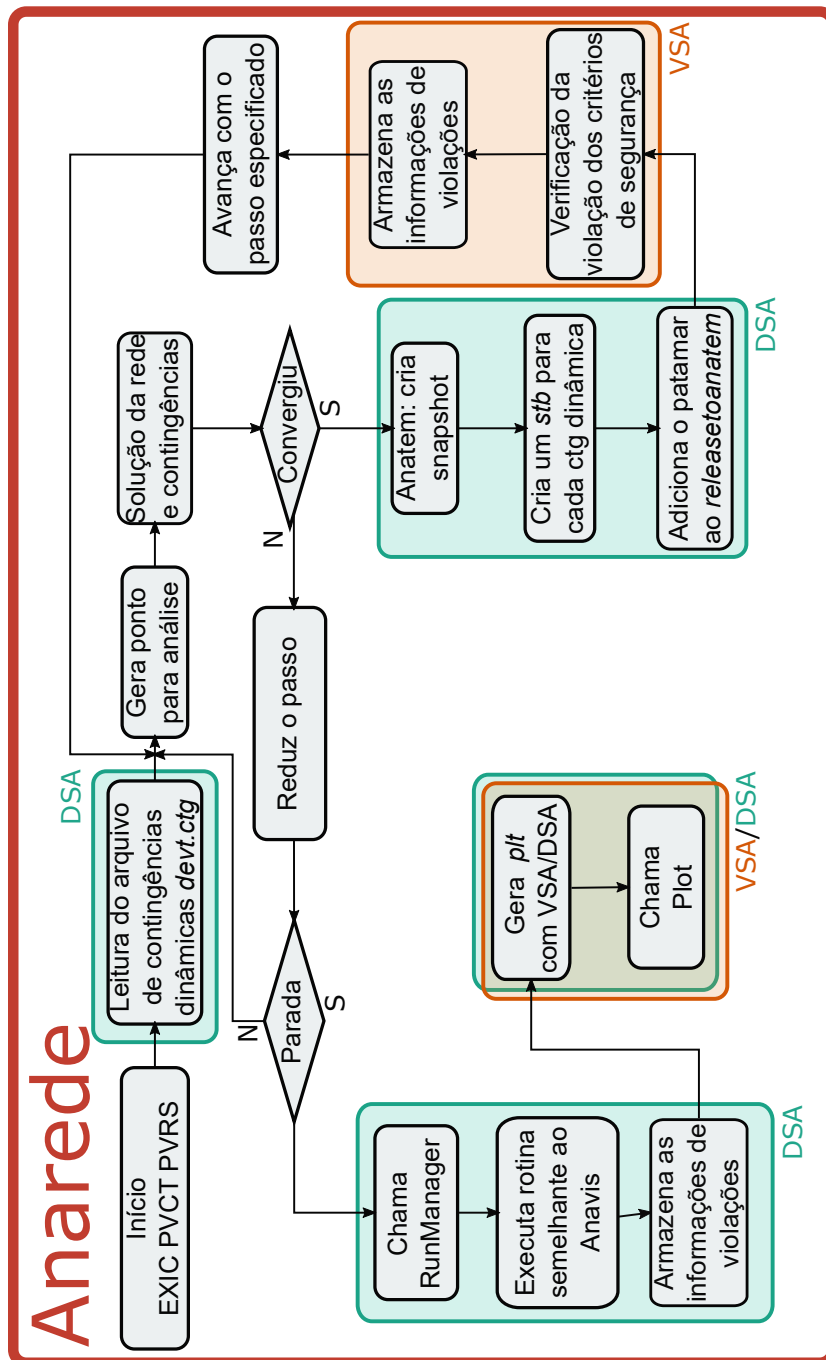


Figura 4.12: Fluxo de dados no programa Anarede para o FPC com Informação de Segurança

(como é o caso do código espaguete); ou então quando se deseja proteger as funções originais. Por vezes, toma-se tal decisão não pela dificuldade ou receio da implementação, mas pela grande quantidade de mudanças que o código original exige.

Optou-se, contudo, pela modificação das rotinas originais. Tal decisão se baseou no uso prático do programa: as respostas do Fluxo de Potência Continuado e FPC com Informação de Segurança precisam dar resultados coerentes. Isto é, a menos de uma mudança eventual no critério de parada, demais pontos encontra-

dos e heurísticas utilizadas deveriam coincidir. Para o usuário experiente, a menor diferença entre as respostas poderia levar à dúvida quanto ao recurso novo. É de extrema importância que tal situação seja evitada. Por isso, o código original deve ser devidamente estudado de maneira a receber os novos recursos, sem alterar o funcionamento tradicional do mesmo.

Note que as contribuições para o algoritmo do FPC seguem destacadas dentro das caixas referente as etapas VSA e DSA. Note também que são compatíveis com as etapas destacadas no algoritmo da região de segurança da fig. 3.6. De fato, as rotinas de monitoração são as mesmas daquelas utilizadas para a geração dos nomogramas.

Além das implementações óbvias, precisou-se adaptar a lógica do funcionamento do FPC do Anarede. As opções de monitoração quando passadas para o código EXIC, por exemplo, funcionavam como critério de parada caso fosse constatada alguma violação na rede supervisionada. Naturalmente, em conjunto com a opção PVRS, tal critério de parada é ignorado. Os demais critérios de parada são mantidos: máximo carregamento desejado; número de patamares superiores a constante ICIT; e mínimo passo atingido na tentativa de redução.

Como a quantidade de patamares a serem analisados, *a priori*, é desconhecida, as informações de violação são guardadas em uma estrutura de dados que faz uso de listas encadeadas, cuja extensão pode ser tão longa quanto a memória RAM permitir. Desta maneira, não se corre o risco de violar vetores de dados, um inconveniente típico em programas cuja alocação de memória seja estática.

4.3.3 Arquivos de Saída e Resultados

A ferramenta do FPC gera, como resultado, um arquivo de plotagem (geralmente *pv.plt*) e um relatório acerca de cada patamar e o critério de parada atingido. Para a ferramenta de FPC com Contingência, o relatório é acrescido de informações dos casos em contingência para cada patamar.

Para a ferramenta proposta, espera-se apenas que sejam gerados dados referentes às regiões de interesse que em conjunto com as curvas descritas no arquivo de plotagem *pv.plt*, gerem gráficos semelhantes aos da fig. 4.7

Os resultados da informação de segurança encontrados pela ferramenta são escritos ao final do arquivo *pv.plt*, num formato tabelado em que cada linha é referente a um patamar encontrado pelo caso. Há um cabeçalho indicando se as informações são referentes às contingências estáticas (PVRS_VSA) ou se são referentes às contingências dinâmicas (PVRS_DSA).

A fig. 4.13 ilustra o trecho de código que aparece ao final do arquivo, com as informações de segurança de cada patamar. A definição de cada campo segue.

```

PVRV_VSA
(volt) (flux) (mvar) (lseg) ( nc ) (      identificacao da configuracao pior      )
  0     0     0     0     0
  1     0     0     1     0 LT_4_6_1
  5     6     0    11     1 LT_4_6_1
  3     2     0     5     1 Caso_Base
  5     3     0     8     2 LT_8_9_1
PVRV_DSA
(volt) (flux) (mvar) (lseg) ( nc ) (      identificacao da configuracao pior      )
  0     0     0     0     0
  0     1     0     1     0 Caso Base
  1     2     1     3     5 ABERTURA DA LT 4 - 6 [1]
  3     3     1     6     5 ABERTURA DA LT 4 - 6 [1]
  4     4     1     8     5 ABERTURA DA LT 4 - 6 [1]

```

Figura 4.13: Exemplo de trecho de um arquivo .plt oriundo do FPC com Informação de Segurança

volt número de ocorrências de violação de tensão do pior caso;

flux número de ocorrências de violação de carregamento de circuito do pior caso;

mvar número de ocorrências de violação de geração de reativo do pior caso;

lseg número de ocorrências combinadas de violação de tensão e carregamento de circuito do pior caso;

nc quantidade de contingências não-convergentes

A identificação da pior contingência é descrita segundo o seguinte critério: caso, naquele patamar, uma contingência não convirja, ela é tida como a pior; do contrário, compara-se se algum caso apresentou violação de tensão; em seguida, compara-se se algum caso apresentou violação de carregamento de circuito. Em caso de mesma importância hierárquica, escolhe-se a contingência que aparecer primeiro na lista de contingências, sendo o caso base prioritário sobre todas.

Os números que aparecem nos campos **volt**, **flux**, **mvar** e **lseg** apresentam significados um pouco distintos em relação ao VSA e ao DSA. No VSA, dizem respeito a maior quantidade de violações encontrada para todos os casos daquele patamar. No DSA, por um motivo de compatibilidade como funcionam outras estruturas do DSA, é informado de maneira booleana; ou seja, 1 ou 0 para o caso de ter se verificado a violação ou não. Contudo, para o DSA, o caso base analisado pelo Anarede é levado em consideração para a determinação das regiões, assim, pode-se ter outros números que não a representação booleana no resultado sob **PVRV_DSA**. Eventualmente, tal formatação será compatibilizada com os resultados obtidos no VSA.

4.4 Testes para o FPC com Informação de Segurança

Para a avaliação da ferramenta do FPC com Informação de Segurança, considerou-se dois sistemas: um caso reduzido e já utilizado em demonstração da região de segurança via nomograma (9 Barras) e um sistema que seja representativo do Sistema Interligado Nacional. No caso, o sistema é um cenário Norte-Importador, Inverno de 2017, utilizado num estudo sobre região de segurança devido à alta penetração de geração eólicas no nordeste[23].

4.4.1 Exemplo 9 Barras

O caso “9 Barras” utilizado para a exemplificação desta ferramenta é o mesmo caso do apresentado na fig. 3.1. Para este caso, será feito um incremento de carga em todo o sistema em passos de 3%, com fator de potência constante, até um limite de 200% de acréscimo em relação ao valor da carga inicial (315 MW). Neste caso, a barra *swing* tomará todo o acréscimo de carga.

Para este sistema, com todos os controles adicionais congelados, aplicou-se uma lista de contingências do tipo $N - 1$. Os elementos monitorados são todas as barras e todos os circuitos do sistema. Com estas condições, obteve-se as informações de segurança estática e dinâmica do sistema em função do crescimento de carga, conforme as figs. 4.14 e 4.15.

É possível observar que, para os modelos dinâmicos informados, há um problema nas soluções das simulações dinâmicas. De fato, ao se analisar os relatórios individuais das simulações, constatou-se que a simulação não iniciava devido à saturação das máquinas. Tal situação só é possível pois existe um fraco acoplamento entre as informações estáticas e as dinâmicas, algo comum em sistemas-exemplo.

Considerando-se a resposta estática da fig. 4.14, o analista rapidamente poderá observar as margens de carregamento em que começam a surgir os problemas, e qual a natureza desses problemas. Para esse sistema específico, analisando os pontos de fronteira das regiões, observa-se que problemas de carregamento de circuito começam a surgir quando a carga aumentar 30% em relação ao ponto base; problemas de tensão aparecem com 42% de incremento de carga; e problemas de convergência matemática aparecem quando há um incremento de 63% da carga.

De fato, ao se desenhar as curvas PV de uma barra em particular considerando todas as contingências possíveis, chega-se às figs. 4.16 e 4.17. Considerando o modelo de carga do sistema (potência constante), conclui-se que a contingência da queda da linha de transmissão 4-6 é a responsável pelo colapso do sistema.

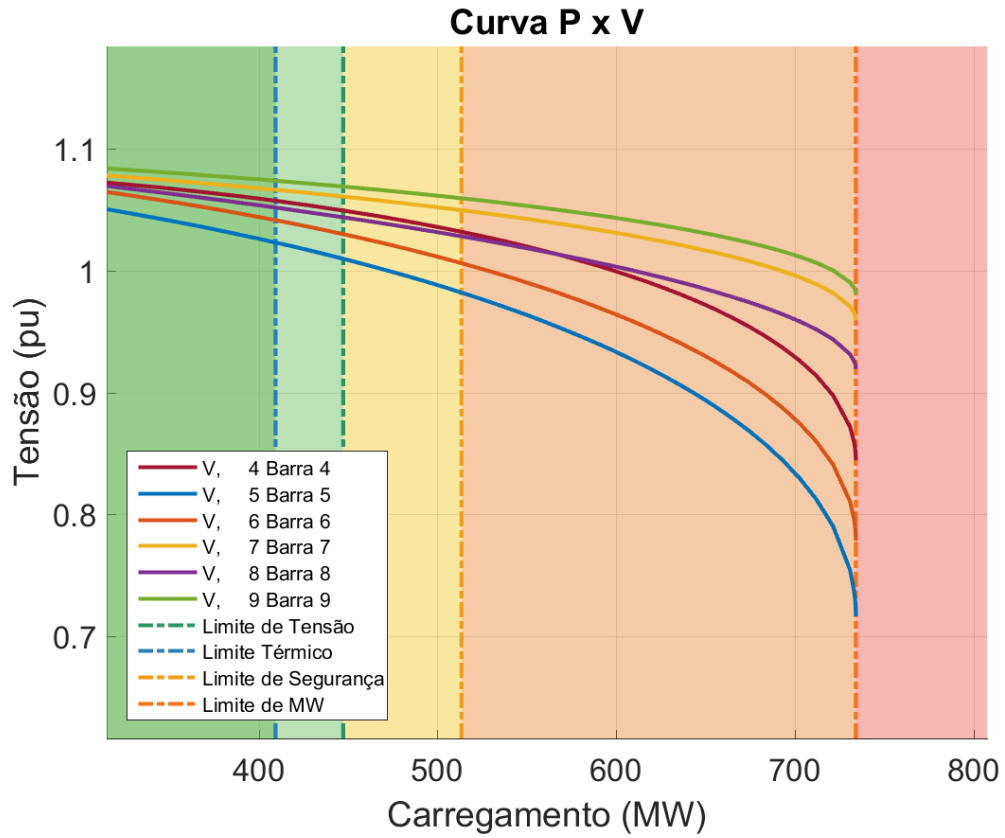


Figura 4.14: Segurança Estática para Curva PV do Sistema 9 Barras

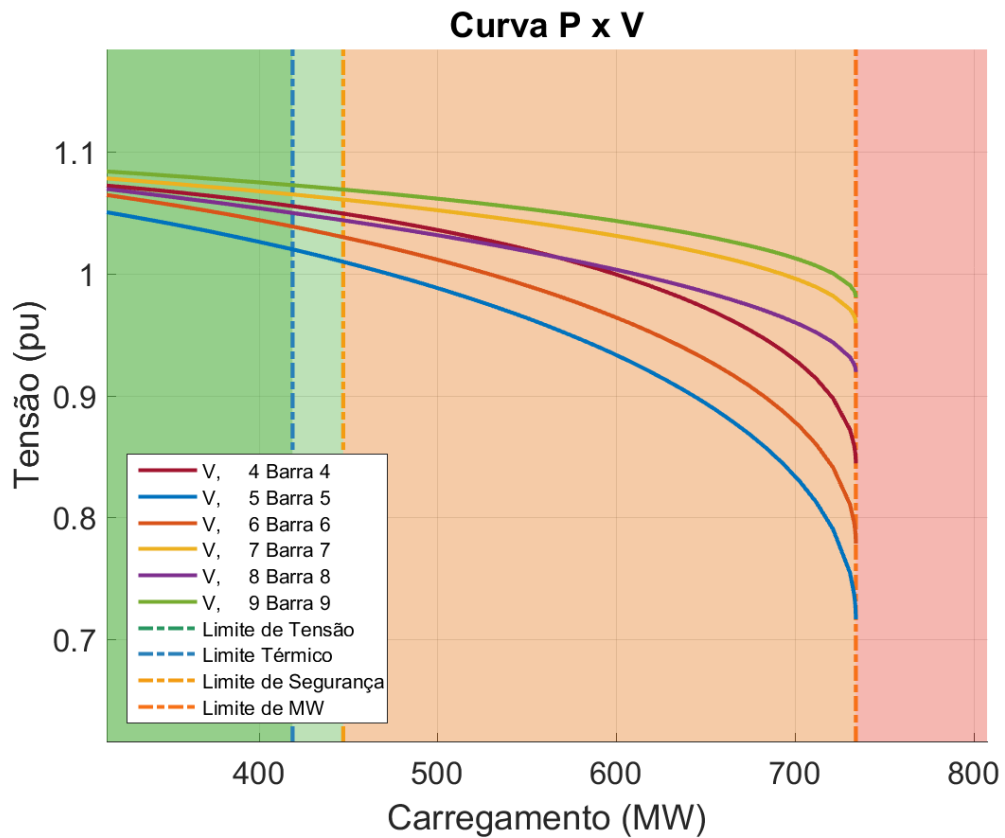


Figura 4.15: Segurança Dinâmica para Curva PV do Sistema 9 Barras

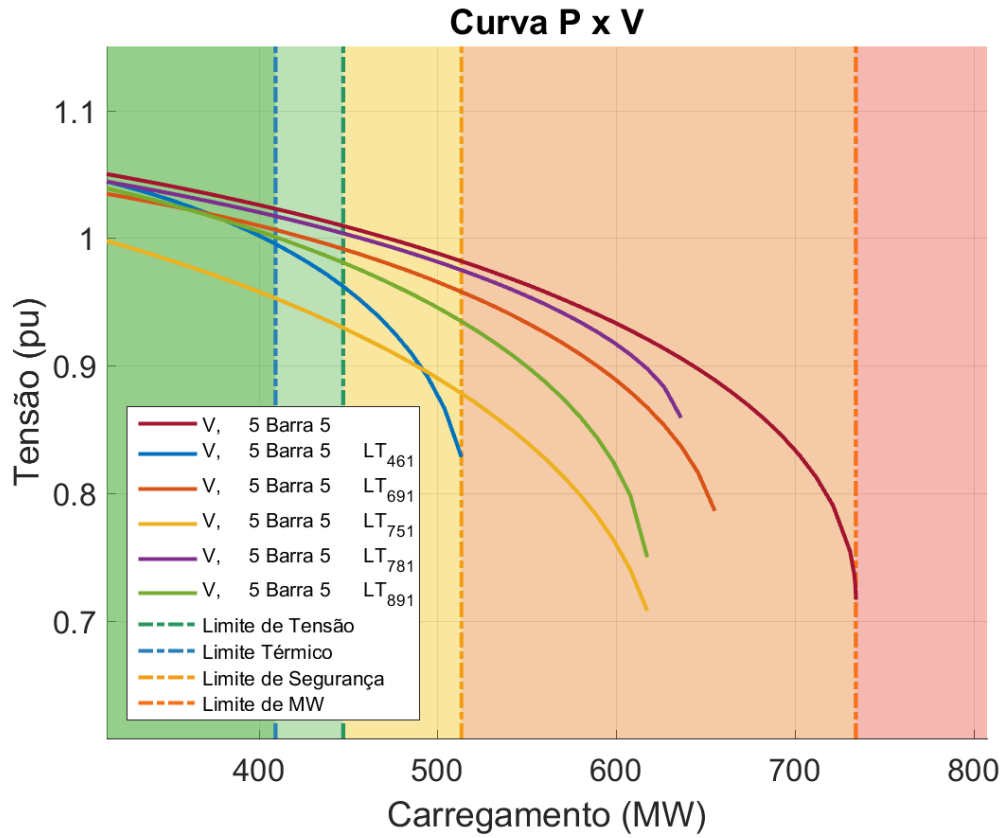


Figura 4.16: Segurança Estática para Curva PV do Sistema 9 Barras (ctg)

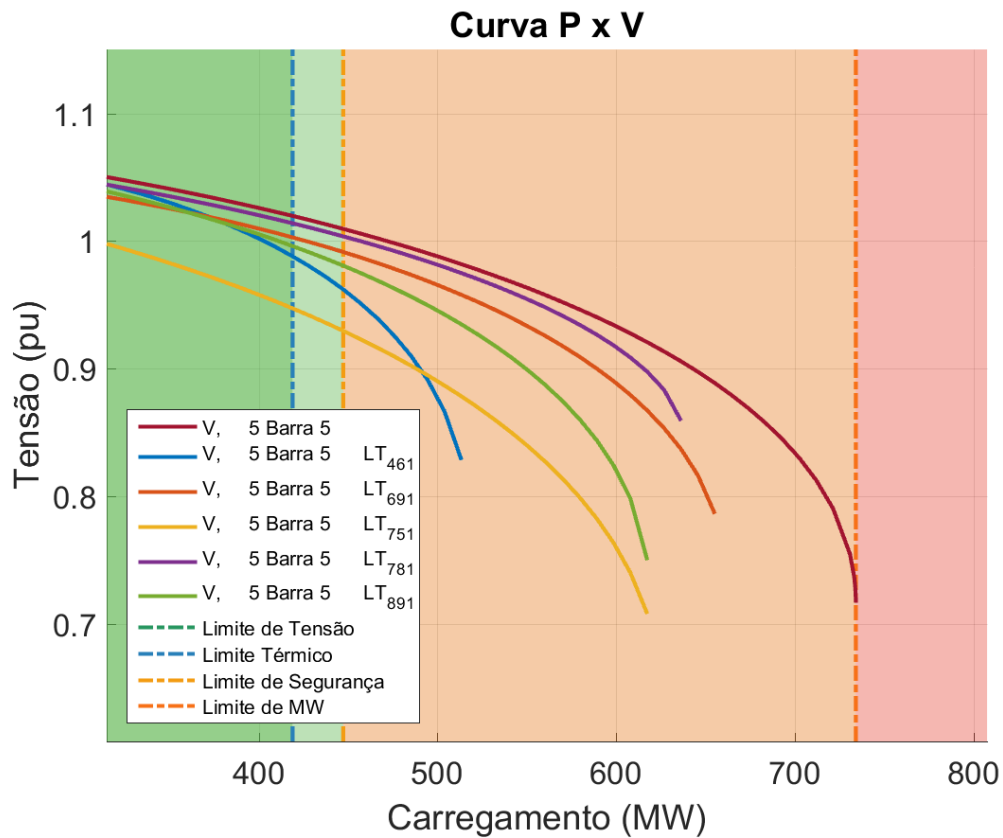


Figura 4.17: Segurança Dinâmica para Curva PV do Sistema 9 Barras (ctg)

4.4.2 Exemplo Sistema Interligado Nacional

Para este exemplo, utilizou-se um caso do SIN cujo acesso pode ser feito pelo usuário através da página do ONS na Internet. A rede é oriunda do caso do PAR (Plano de Ampliação e Reforços) de 2017[56], enquanto que a base dinâmica foi retirada do caso de referência de Outubro de 2015[57].

Este caso foi um dos sistemas utilizados para um estudo de penetração de geração eólica na região Nordeste[23], no qual foram avaliados alguns cenários de geração sob a observância da segurança estática e dinâmica de elementos relativos ao nível de tensão de 500kV.

Para este sistema, o crescimento de carga e geração com passo de 1% realizado estava limitado à área de Minas Gerais. Aplicou-se, ainda, as contingências contidas na tabela 4.1, congelando os controles de transformadores no processo.

Tabela 4.1: Lista de contingências estáticas a serem aplicadas no caso do SIN

#	Descrição
1	Andra-P.Cal1
2	Aracua-Itaobi
3	Brasop-Itaju3
4	Mocam-Manga
5	P.Fialho-Vitoria

Obteve-se as informações de segurança estática e dinâmica desse sistema, para as condições impostas. O traçado da curva PV com informação de segurança estática para algumas barras se encontra na fig. 4.18.

Pode-se, também, realizar o traçado da curva PV para barras que tenham elementos que participem no suporte de potência reativa do sistema, como Compensadores Estáticos de Reativo (CER) e Compensadores Síncronos (CS). A fig. 4.19 mostra um exemplo de duas barras que têm CER e CS conectados a elas. Através dessas curvas, o operador consegue observar uma relação entre a tensão terminal do barramento a que este equipamento está conectado e violações nas definições de segurança deste sistema. Tal análise não seria possível em uma curva PV tradicional.

As informações de segurança dinâmicas encontradas para este sistema pelo Anatem não diferem do Anarede, sendo visualmente semelhante à fig. 4.18. Há, contudo, algumas diferenças quanto à convergência dos casos. Para o caso dinâmico, as contingências começaram a ter problema de convergência em momentos anteriores das suas versões estáticas. A partir dos relatórios de saída desses casos, verificou-se que havia um problema de instabilidade de fato, não sendo um problema numérico da simulação ou condição inicial inviável. A fig. 4.20 mostra a diferença entre a resposta da etapa VSA e da etapa DSA em termos desta não-convergência dos casos.

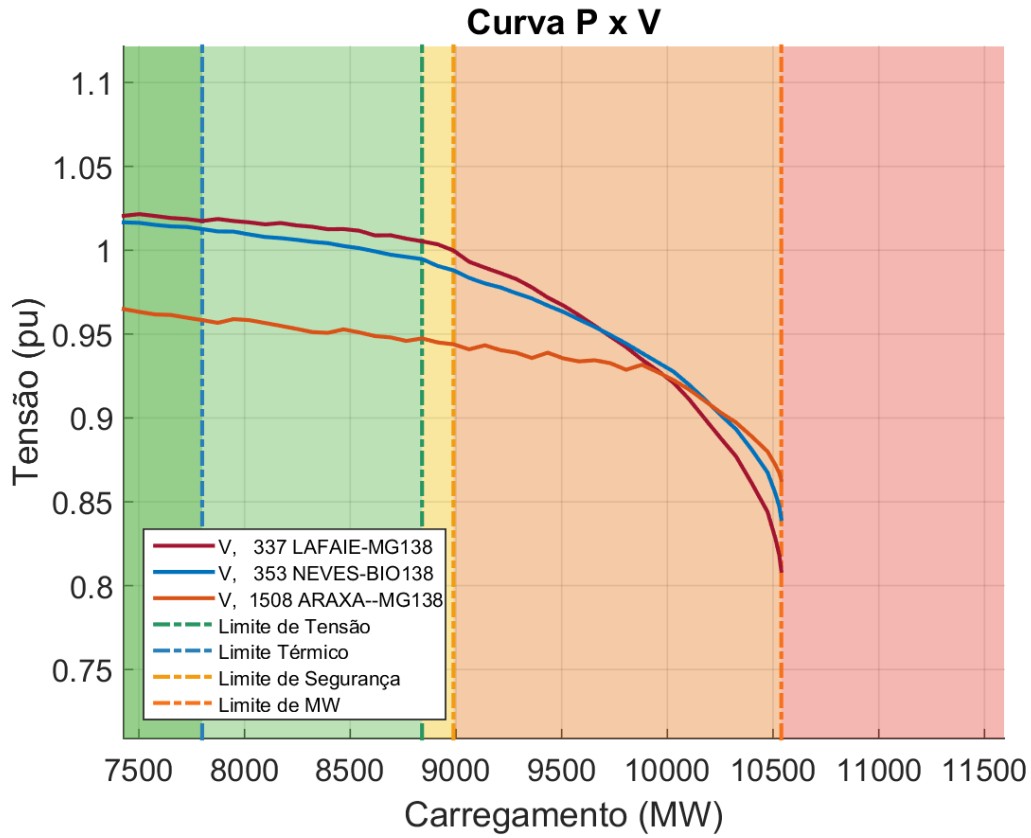


Figura 4.18: Segurança Estática para Curva PV do Sistema SIN

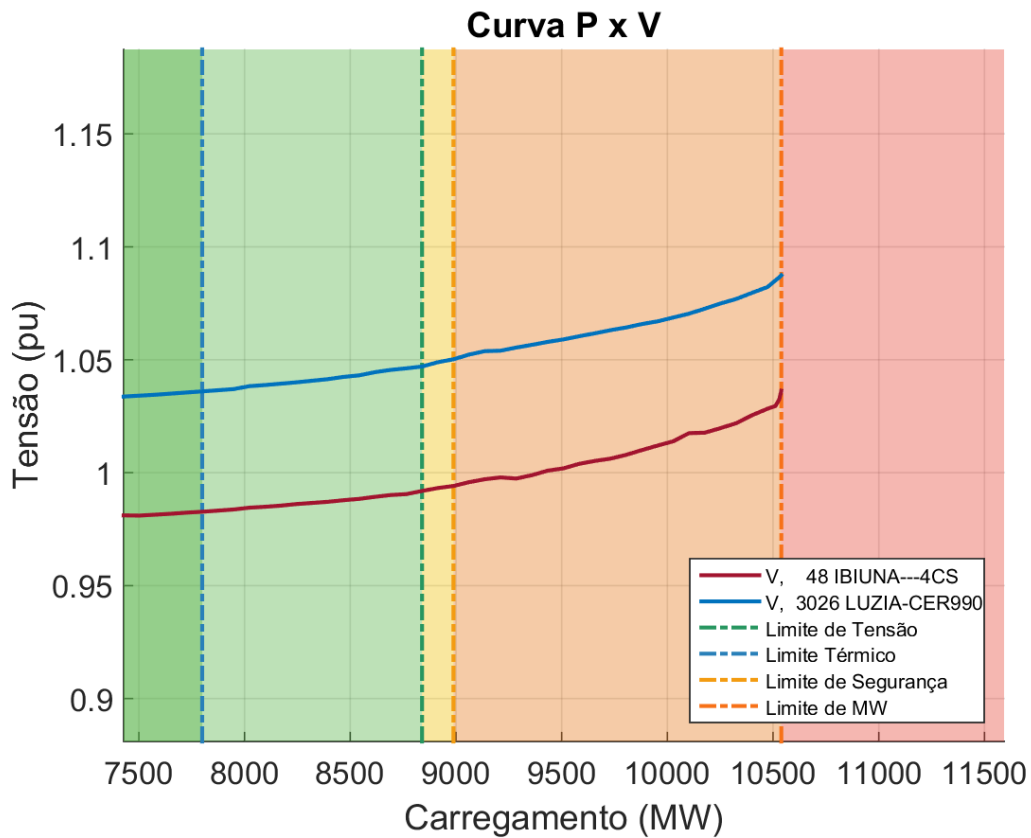


Figura 4.19: Curvas PV para CS e CER do Sistema SIN

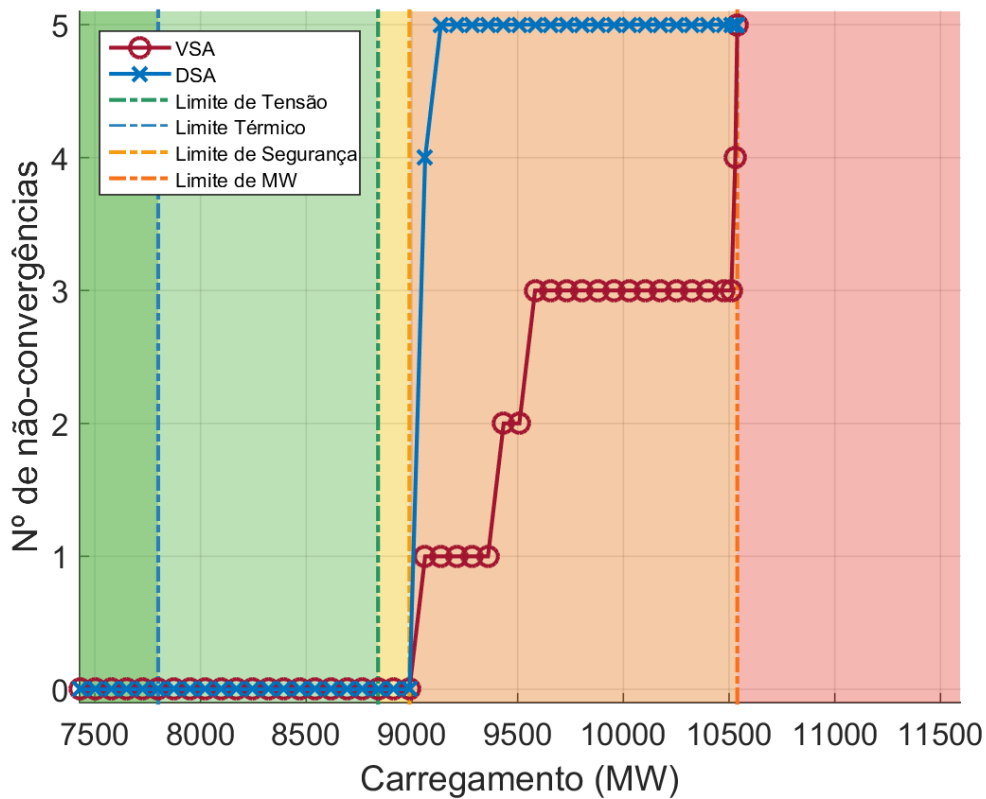


Figura 4.20: Diferença na convergência das etapas VSA e DSA

A partir desta ferramenta, é possível também observar como as violações evoluem conforme a carga é aumentada. Sabendo o número de violações de tensão ou fluxo encontradas em cada ponto, gera-se sinais que descrevam a dinâmica dessas grandezas, como apresentado na fig. 4.21.

Para o operador e para o analista, este tipo de informação (apresentada de maneira visual) é de interesse, uma vez que agrega de maneira quantitativa a gravidade dessas violações. Note que, devido à forma como o Anatem emite seus resultados para o DSA (valores booleanos), tais sinais não vão possuir significância para esta etapa.

Devido à abstração utilizada na concepção do algoritmo utilizado para a realização da avaliação de segurança dinâmica, para o Anatem é indistinguível o motivo pelo qual a simulação está sendo realizada. Isto é, internamente no programa, não há diferença entre o chamamento realizado para a avaliação do nomograma ou para a avaliação do FPC.

Tal condição possibilita que, mesmo para o FPC, o Anatem seja capaz de calcular, para cada ponto encontrado pelo FPC, a linearização do sistema pelo método ERA e o mínimo amortecimento do sistema, à semelhança dos nomogramas de amortecimento.

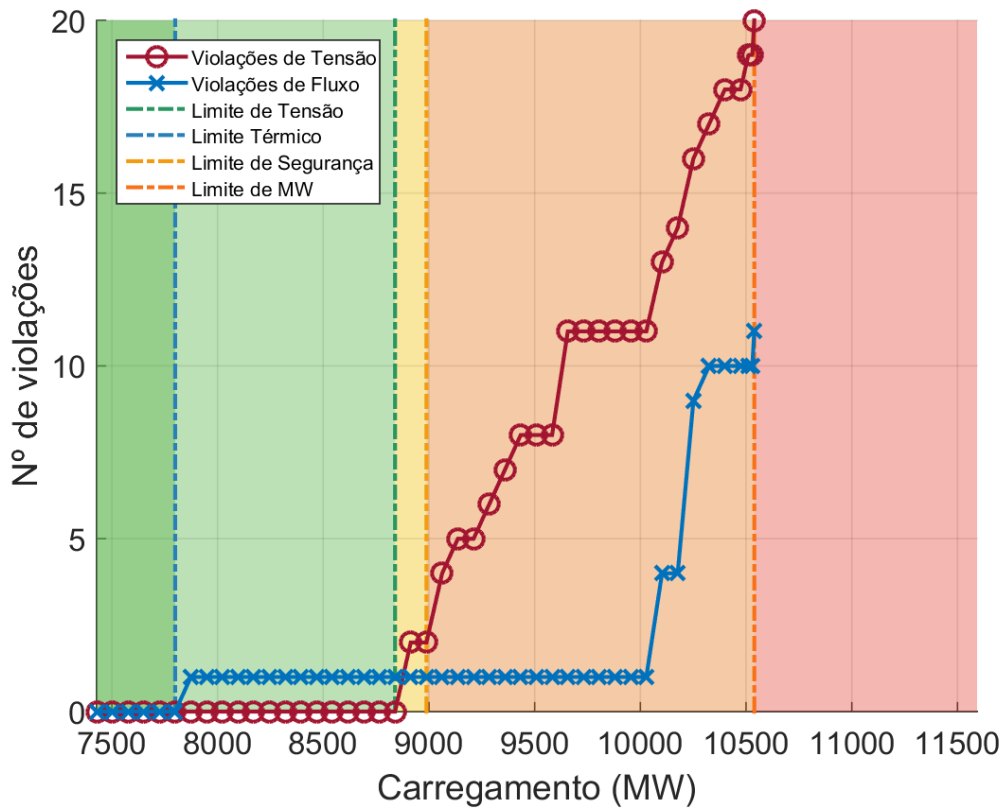


Figura 4.21: Número de violações encontradas para a etapa VSA

As figs. 4.22 e 4.23 apresentam o traçado do amortecimento encontrado para cada ponto do FPC. Para a fig. 4.22, é mostrado o mínimo amortecimento encontrado, conforme a metodologia utilizada para a geração dos nomogramas de amortecimento (menor valor encontrado dentre todas as contingências). Já na fig. 4.23, são apresentados os valores de amortecimentos mínimos encontrados para três das contingências analisadas. O fundo colorido é referente às informações de segurança encontradas pela etapa DSA.

Nas referidas figuras, é possível observar que para um carregamento de 8400MW , o sistema apresentaria modos instáveis. Nos dois pontos seguintes, o método encontrou apenas modos estáveis e bem amortecidos; mas em seguida encontrou novamente modos instáveis.

Tal resultado leva a crer que houve algum problema de convergência no método. Para avaliar se houve falha na identificação dos modos pelo método, simulou-se portanto os patamares 15 ($P_l \approx 8500\text{MW}$), 16 e 18. Na fig. 4.24, são mostrados os sinais de desvio de frequência, que são utilizados para estimação do amortecimento, para a máquina da usina de Volta Grande e para cada um dos patamares citados. A fig. 4.25 apresenta os mesmos sinais, mas limitados à janela de tempo utilizada para a estimação do amortecimento pelo método ERA.

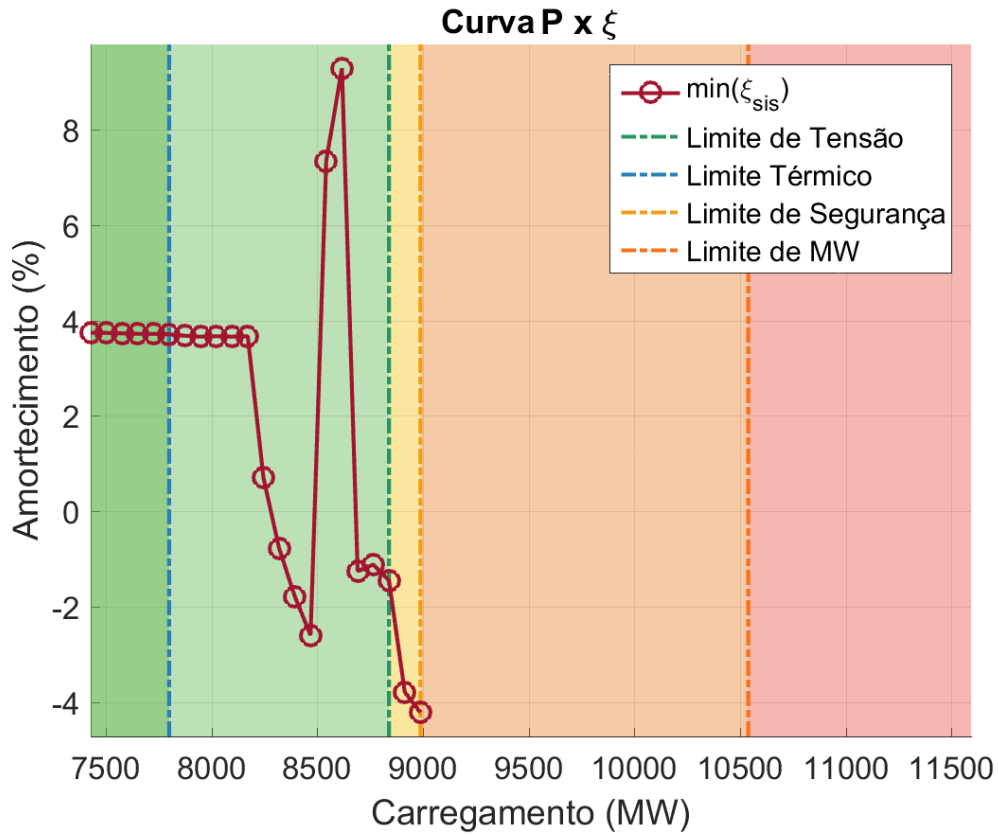


Figura 4.22: Mínimo amortecimento encontrado pelo método ERA no FPC

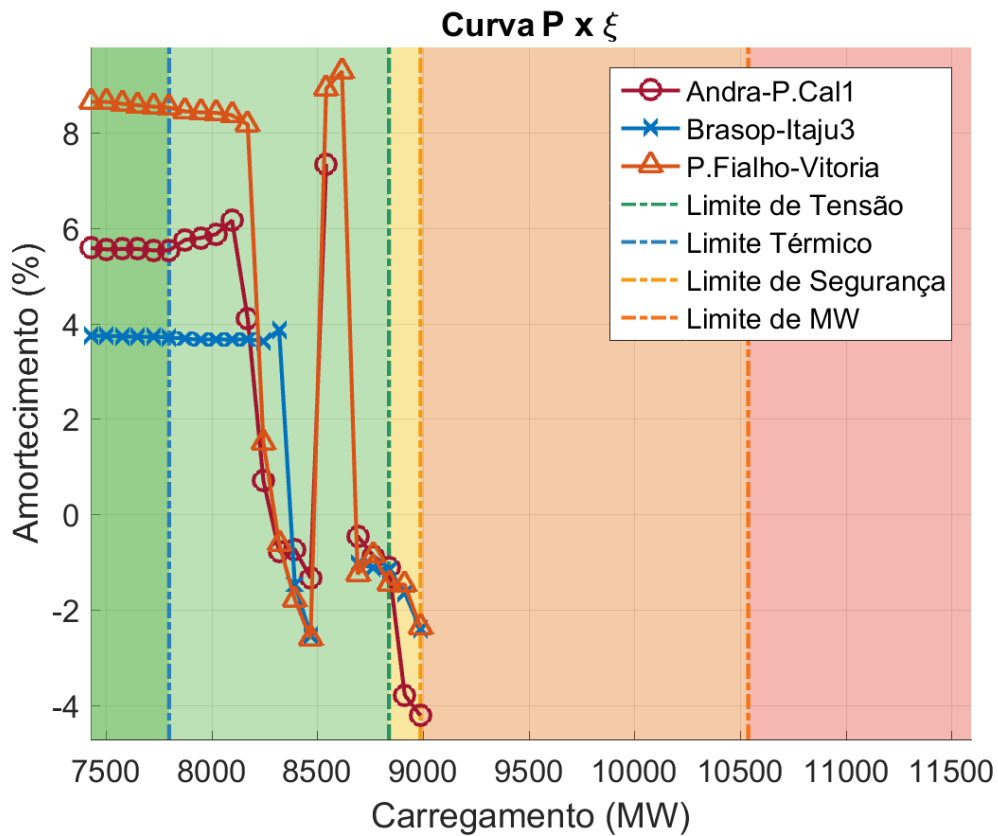


Figura 4.23: Mínimo amortecimento para algumas contingências

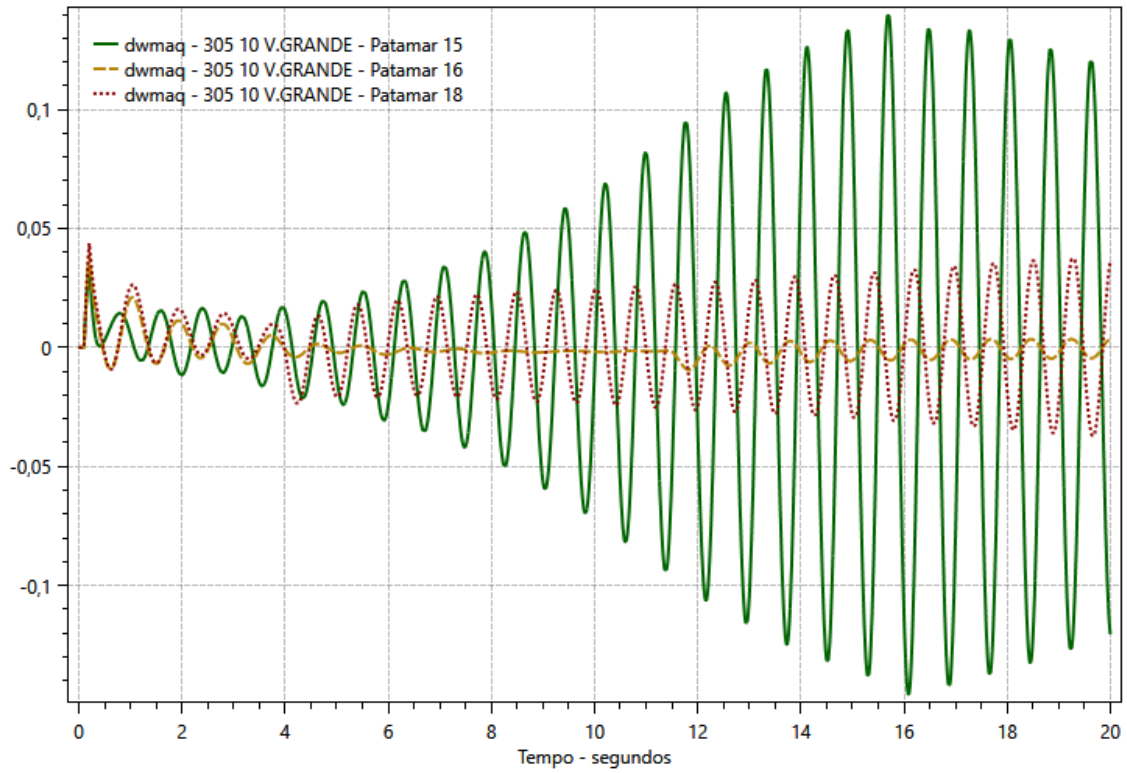


Figura 4.24: Comparação da resposta no tempo de alguns patamares

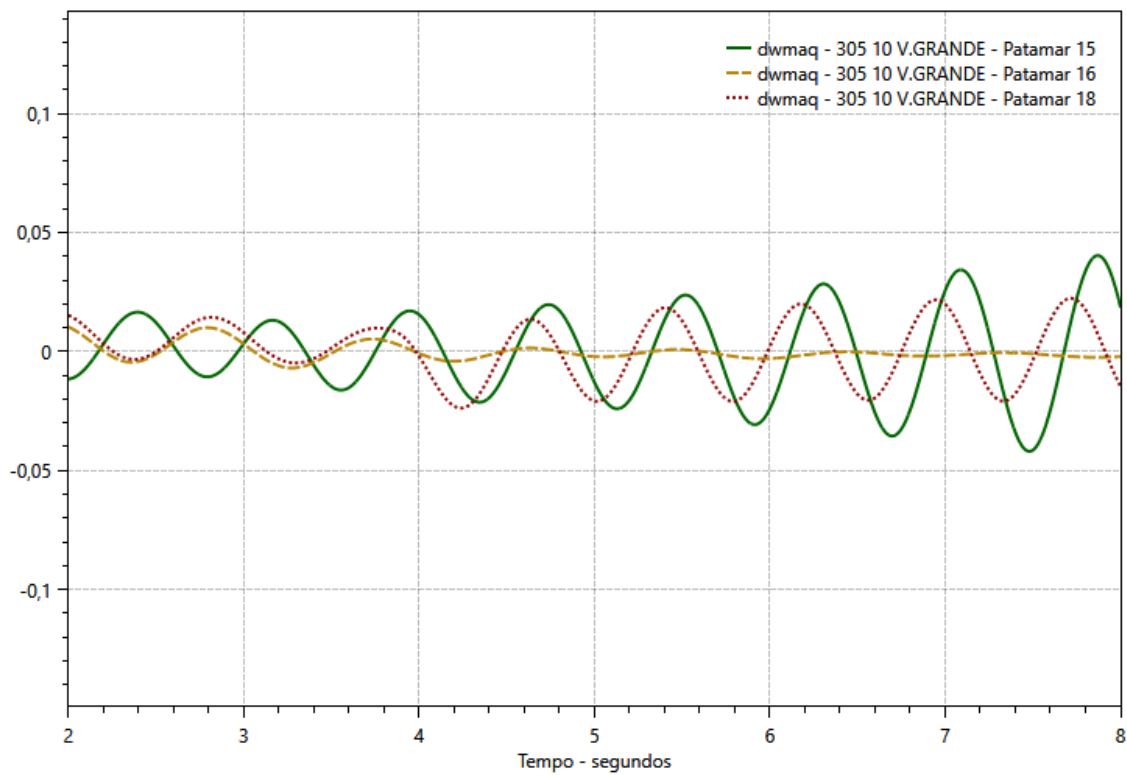


Figura 4.25: Janela da simulação utilizada para estimação

Considerando o resultado da fig. 4.25, os resultados do amortecimento mostrados no traçado da curva $P \times \xi$ apresentados nas figs. 4.22 e 4.23 são coerentes. De fato, no patamar 15 é verificada uma instabilidade mais acentuada; no patamar 16 é verificado o sinal estável e bem amortecido; e no patamar 18 é verificada uma instabilidade, mas mais suave que no caso do patamar 15.

Quando é considerada uma janela de tempo maior (fig. 4.24), não se pode concluir sobre a estabilidade do patamar 15. Para o patamar 18, a instabilidade observada na janela de tempo de 2s a 8s se manteve. Contudo, para o patamar 16, observa-se a aparição de um ciclo limite depois de 11 segundos de simulação.

A mudança de comportamento repentina ocorrida pode se dar quando existe alguma não-linearidade que não seja continuamente derivável[7]. Em tais situações, há um ponto que limita duas regiões distintas que descrevem o sistema. No caso do controlador desta máquina em questão, existe uma malha de subexcitação, contendo um bloco não-linear chamado MAX. Na prática, este bloco funciona como uma chave, alternando entre duas malhas de controle, escolhendo aquela malha cuja saída seja a maior. A fig. 4.26 mostra o trecho do regulador de tensão que apresenta este bloco.

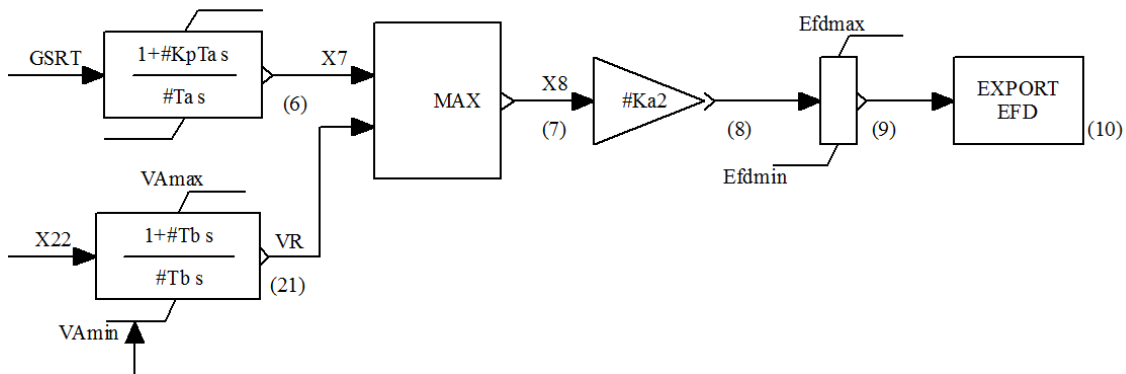


Figura 4.26: Bloco não-linear MAX do regulador de tensão

Sabendo da existência dessa não-linearidade, fez-se o traçado do gráfico dos sinais VR, X7 e X8, bem como do sinal do desvio de frequência. A fig. 4.27 apresenta estes sinais.

É possível observar que no instante em que aparece o ciclo limite, o sinal de saída do bloco X8, responsável por comandar a tensão de campo da máquina, também sofre uma perturbação, indicando correlação entre os sinais. De fato, ao analisar as entradas deste bloco, X7 e VR, é possível concluir que tal mudança acontece quando há o cruzamento destes sinais. A fig. 4.28 mostra com mais detalhes a mudança na configuração do sistema, quando o sinal X8 (em traço) deixa de rastrear o sinal X7 (em vermelho) e passa a rastrear o sinal VR (em verde).

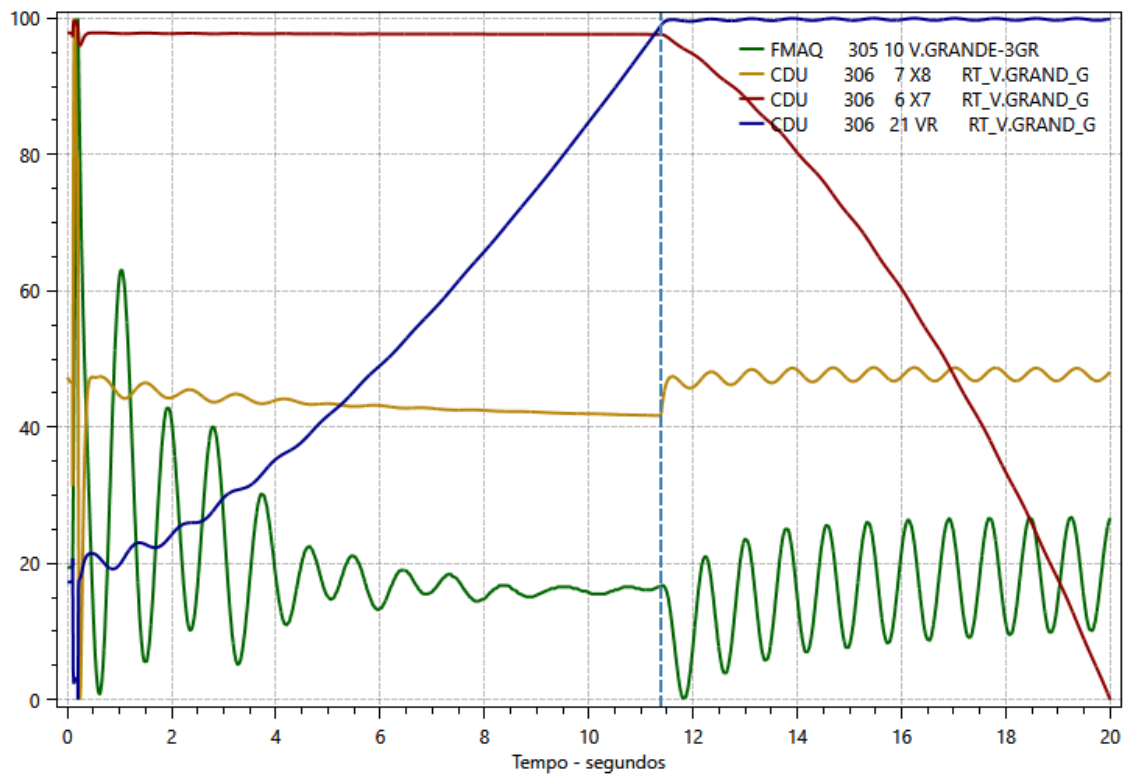


Figura 4.27: Observação do surgimento do ciclo limite

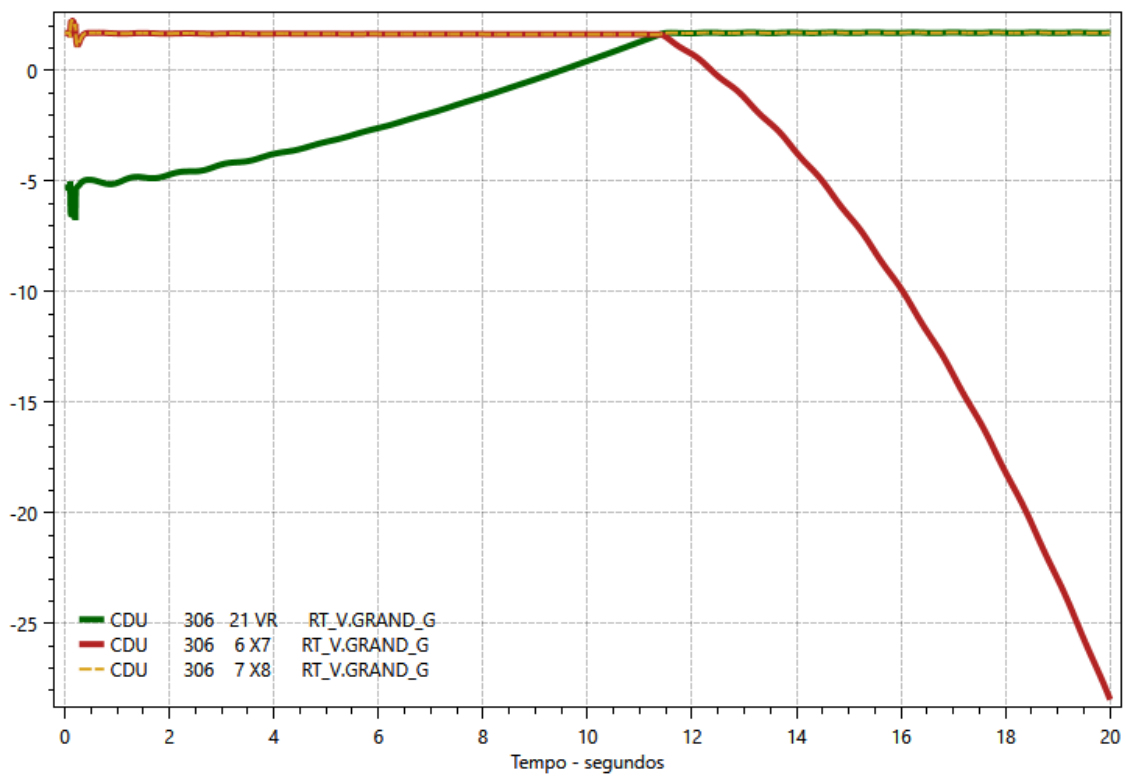


Figura 4.28: Observação do sinal X8 alternando do sinal X7 para o sinal VR

Este caso exemplifica uma das premissas básicas do método: a aproximação linear é um modelo válido enquanto as variáveis de estado orbitam o ponto de linearização. Quando o bloco MAX comutou de um sinal para o outro, o sistema não-linear foi alterado e, portanto, o sistema linearizado já não mais é coerente. A qualidade do modelo linear encontrado, portanto, será dependente da manutenção das equações que definem o sistema.

4.5 Conclusões Parciais

A ferramenta de Fluxo de Potência Continuado com Informação de Segurança mostra-se um poderoso recurso para o usuário, tendo aplicações no contexto do planejamento e no estudo da operação. Através deste novo recurso, oferece-se ao usuário uma nova maneira permitindo-o visualizar os limites de carregamento que levam o sistema para problemas de violação de algumas grandezas bem como o colapso de tensão.

O uso da ferramenta é bastante simples, requerendo a preparação de um caso de estabilidade (caso se deseje a simulação da etapa DSA). Seu uso é dado com uma simples declaração da opção de execução PVRS juntamente do código de execução EXIC responsável pela execução do Fluxo de Potência Continuado.

Devido à natureza dos algoritmos envolvidos, é possível ainda realizar o traçado da curva $P \times \xi$, fazendo uso do método ERA apresentado no capítulo anterior.

Capítulo 5

Região de Segurança via Simulação Cronológica de Casos

Neste capítulo será abordada uma forma diferente de se considerar a segurança de um sistema, adicionando-se o conceito de temporalidade aos pontos de operação. Este novo conceito foi incorporado ao programa Anarede como uma nova ferramenta denominada Simulação Cronológica de Casos.

5.1 Proposta

Nas duas abordagens anteriores, Nomogramas de Amortecimento e Fluxo de Potência Continuado com Informação de Segurança, o conceito de segurança consistia em buscar as margens em que um ponto de operação poderia variar, dado certos parâmetros.

Nos Nomogramas de Amortecimento, que herdaram sua natureza da ferramenta VSA/DSA do Anarede, a margem de segurança era obtida através da busca de combinações de geração dos grupos geradores, para uma carga considerada constante. Ou seja, para uma situação em que o sistema se mantenha com determinado comportamento de carga e integridade de rede, como seria possível, através de redespacho, melhorar a distância entre o ponto de operação e as margens que separam as regiões de segurança.

No Fluxo de Potência Continuado com Informação de Segurança, a margem de segurança é obtida ao se observar os limites que definem as regiões a partir do aumento de carga e de geração, com uma direção de crescimento previamente conhecida. Ou seja, para um dado conjunto de regras de proporcionalidade e crescimento, descobrir o quanto a carga pode aumentar no sistema (ou região) até que algum limite seja violado.

Para ambos os casos, o conceito de temporalidade é removido do problema.

Propôs-se então uma ferramenta que, em parte, é capaz de devolver esta propriedade às análises de segurança realizadas nos sistemas de potência pelos programas Anarede e Anatem.

A Simulação Cronológica de Casos (SimCron) é uma ferramenta que se baseia no conceito da Simulação de Monte Carlo Sequencial[58], onde para uma dada janela de tempo, um sistema a ser estudado é modificado sucessivamente de maneira discreta.

De uma maneira mais abrangente, a ferramenta pode ser entendida como algoritmo capaz de rodar uma mesma rotina de análise de contingência para diferentes casos definidos previamente, com o objetivo de se verificar as violações definidas pelo contexto VSA/DSA. As transições entre os casos não são analisadas e o processo de síntese desses casos é alheio à ferramenta¹.

Por exemplo, seja um sistema de potência descrito em uma estrutura de dados do Anarede na forma de um caso. Suponha que se deseja avaliar esse sistema, sob as condições de operação previstas para o dia seguinte, discretizado em horas; isto é, sabendo-se a carga de cada barra, geração de cada usina e disponibilidade de circuito a cada hora da janela de análise. Todas essas situações, descritas na forma de casos distintos, são então avaliadas pela ferramenta de Simulação Cronológica de Casos. Como resultado, espera-se um gráfico como o da fig. 5.1.

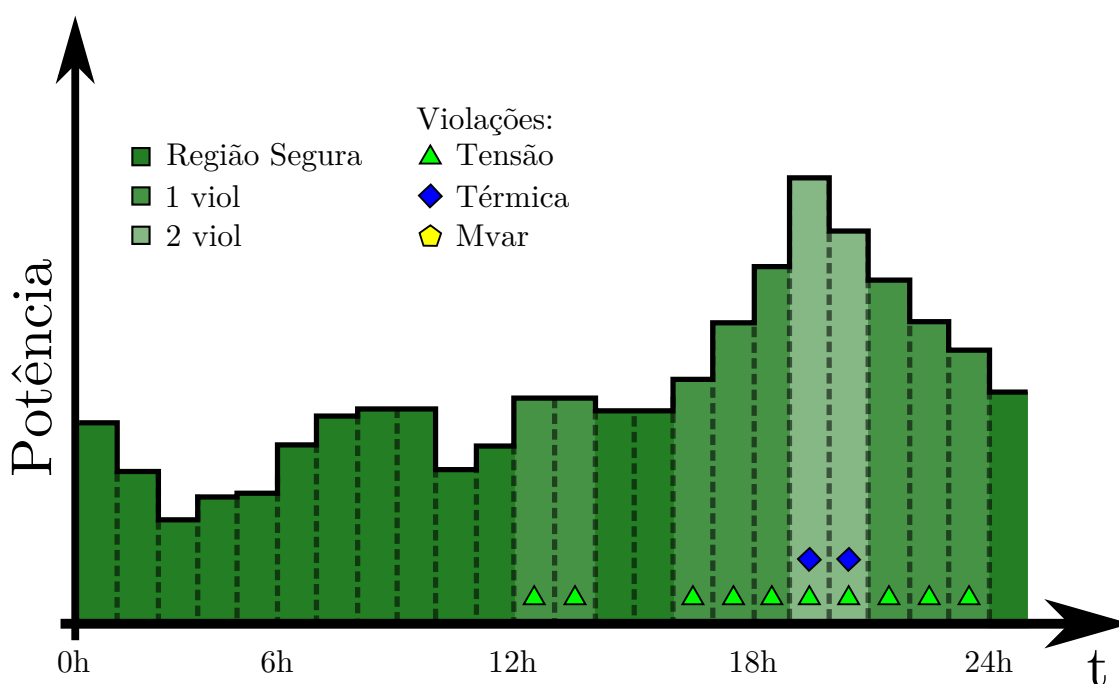


Figura 5.1: Avaliação de Segurança para uma sequência de casos

Embora esteja descrito como a potência (ativa) da carga do sistema, o eixo y pode ser qualquer variável sistêmica, como a tensão de uma barra de referência e

¹Embora os casos possam ser analisados de maneira independente, a síntese dos mesmos se dará considerando a evolução, e portanto a dependência, temporal do sistema

carga de uma determinada região.

Para cada patamar definido, há uma sinalização dos critérios de segurança que foram violados, com uma gradação de cor indicando a quantidade de violações e marcadores específicos para definir a qualidade das violações. No caso da monitoração realizada pelo Anarede, por exemplo, se resume a violação de tensão, violação de fluxo de circuitos e violação de potência reativa (que diz respeito aos limites térmicos das máquinas).

As violações, ainda, podem ser observadas tanto de maneira estática quanto de maneira dinâmica; inserindo-se perfeitamente na ferramenta de VSA/DSA. Para o caso dinâmico, considera-se a análise de contingências dinâmicas a partir de cada patamar, mas não a transição entre patamares; conforme mencionado anteriormente. A transição entre patamares, contudo, poderia ser estudada utilizando uma ferramenta de simulação quase-estática.

Esta ferramenta também poderia ser aplicada para verificação de patamares de operação no tempo real que já foram observados (tempo passado), possuindo natureza estritamente determinística, como também para projeção de possíveis pontos de operação futuros, possuindo natureza estocástica. Para os pontos de operação futuros, pode-se considerar patamares obtidos através de séries temporais gerados por algum método estocástico, como é o caso da Simulação de Monte Carlo Sequencial. A utilização de métodos probabilísticos possibilita que parâmetros de confiabilidade possam ser calculados, como por exemplo a probabilidade de violação dos critérios de segurança adotados.

O ganho de uma ferramenta que consegue mostrar no tempo como as violações podem ocorrer ou não dá ao operador do sistema, por exemplo, uma noção dos períodos do dia em que a ocorrência de uma contingência pode levar o sistema a operar sob violação.

5.2 Implementação Computacional

Topologicamente, a ferramenta SimCron se comporta como a ferramenta de nomogramas do VSA/DSA, podendo fazer uso das mesmas rotinas, programas auxiliares, paralelização, nomenclatura e demais atributos. Desta maneira, para o usuário, o seu uso se torna naturalmente mais familiar.

Contudo, há de se considerar que as diferenças entre ambas as ferramentas é refletida no conjunto de dados a ser informado, requerendo um mínimo de conhecimento acerca do seu funcionamento.

Como em teoria a ferramenta é extremamente simples, sendo um empilhado visual de informações, torna-se oportuno, portanto, descrever os dados necessários e a implementação de maneira específica, realizada no Anarede.

5.2.1 Conjunto de Dados no Anarede

Além do Código de Execução DDIN utilizado para a informação de alguns dados dinâmicos e apresentado no capítulo anterior, criou-se um novo Código de Execução responsável pelos dados da Simulação Cronológica a ser realizada (DSIC) e um Código de Execução para a execução propriamente dita (EXSC).

O conjunto de dados necessário para a descrição da simulação pode ser resumido nos seguintes itens:

- Um conjunto de dados modificando a rede (estado operativo de circuitos, cargas e geração), para cada patamar desejado;
- Tempo inicial e final em que cada patamar ocorre na simulação;
- Lista de contingências a serem aplicadas;
- Elementos a serem monitorados;

Como a ferramenta SimCron é uma simulação sequencial de casos distintos, muitos parâmetros de rede podem ser diferentes entre os casos analisados. Assim, um conjunto de dados que informe essas mudanças seria grande e complexo.

Adotou-se uma abordagem mais simples: não se descreve os eventos e mudanças em relação ao caso base, mas sim, se informa o número do caso no arquivo histórico a que aquele patamar corresponde. Assim, para cada patamar, se espera que um caso diferente exista dentro de um arquivo histórico.

Em relação aos tempos dos patamares: por projeto, um patamar se encerra no instante em que o próximo se inicia. Desta maneira é redundante informar os tempos de início e término do patamar, uma vez que um dos dois é definido em relação ao seu sucessor ou antecessor. A definição temporal do patamar também pode ser feita em função da duração Δt do mesmo.

Escolheu-se uma configuração onde é informado apenas o tempo inicial de cada patamar, em minutos. A duração do último patamar, pode ser definida como uma média da duração dos últimos dois ou três patamares; a diferença é incólume, pois a mudança visual é potencialmente desprezível.

Caso o usuário não queira informar os tempos individuais de cada patamar, mas sabe que os mesmos se distribuem de maneira mais ou menos uniforme, existe a opção UNIF. Com esta opção ativada, o próprio Anarede determinará o instante em que cada patamar ocorre a partir da informação do tempo inicial e final da simulação.

Em relação às contingências, espera-se que, em cada caso, estejam definidas da mesma maneira. Também se espera que a região monitorada para fluxo e tensão (dentre outros) seja a mesma. Essas suposições são bastante frágeis, contudo.

Suponha que uma sequência de casos tenha sido obtido pela plataforma SAGE. Não há informação de monitoração ou de contingência nesses casos *a priori*; ou mesmo que haja, pode não ser de interesse do operador as informações que vieram no caso. Desta maneira, é preciso passar um novo conjunto de informações para cada um dos casos. Assim, há a possibilidade do usuário informar um arquivo de texto contendo os códigos de monitoração e contingência: este arquivo será passado a cada caso da Simulação Cronológica.

Por fim, como a ferramenta faz uso de uma sequência de casos previamente estabelecidos, julgou-se por bem adicionar a esse Código de Execução a informação do arquivo histórico ao qual casos dizem respeito. Desta maneira, o código se comporta de maneira bastante próxima ao modo de execução *batch*². A fig. 5.2 exemplifica o preenchimento do código DSIC.

```

DSIC
( arquivo      sav                )( ti )( tf )
SAGE20160427.sav
( arquivo pwf                )
monitoracao_ctg.dat
(C ( tempo )
01      359
02      421
03      480
04      540
05      600
06      661
07      720
08      779
09      838
10      904
99999

```

Figura 5.2: Exemplo da utilização do código DSIC

Como mencionado anteriormente, caso se quisesse utilizar a opção UNIF, bastaria preencher os dados referentes a *ti* e *tf* com os tempos inicial e final da janela de simulação, respectivamente. Qualquer informação preenchida no campo *tempo* é ignorada quando esta opção está ativa; de maneira análoga, quando a opção não está ativa, os campos *ti* e *tf* são ignorados.

Para a execução do algoritmo, basta o comando EXSC. Este comando aceita as mesmas opções de execução do código EXRS, como por exemplo ULG2, MOST e EMRG.

²Processamento em *batch* diz respeito a execução de uma série de tarefas em um programa de computador sem a intervenção manual do usuário[59]

5.2.2 Algoritmo de Solução

A interface do programa com o usuário havido sido explicada, resta portanto comentar acerca de como a Simulação Cronológica está inserida dentro das estruturas do Anarede.

De maneira ilustrativa, montou-se o fluxograma da fig. 5.3. Nele é possível observar que as estruturas de DSA, por exemplo, se mantêm praticamente intactas em relação ao apresentado na fig. 3.6.

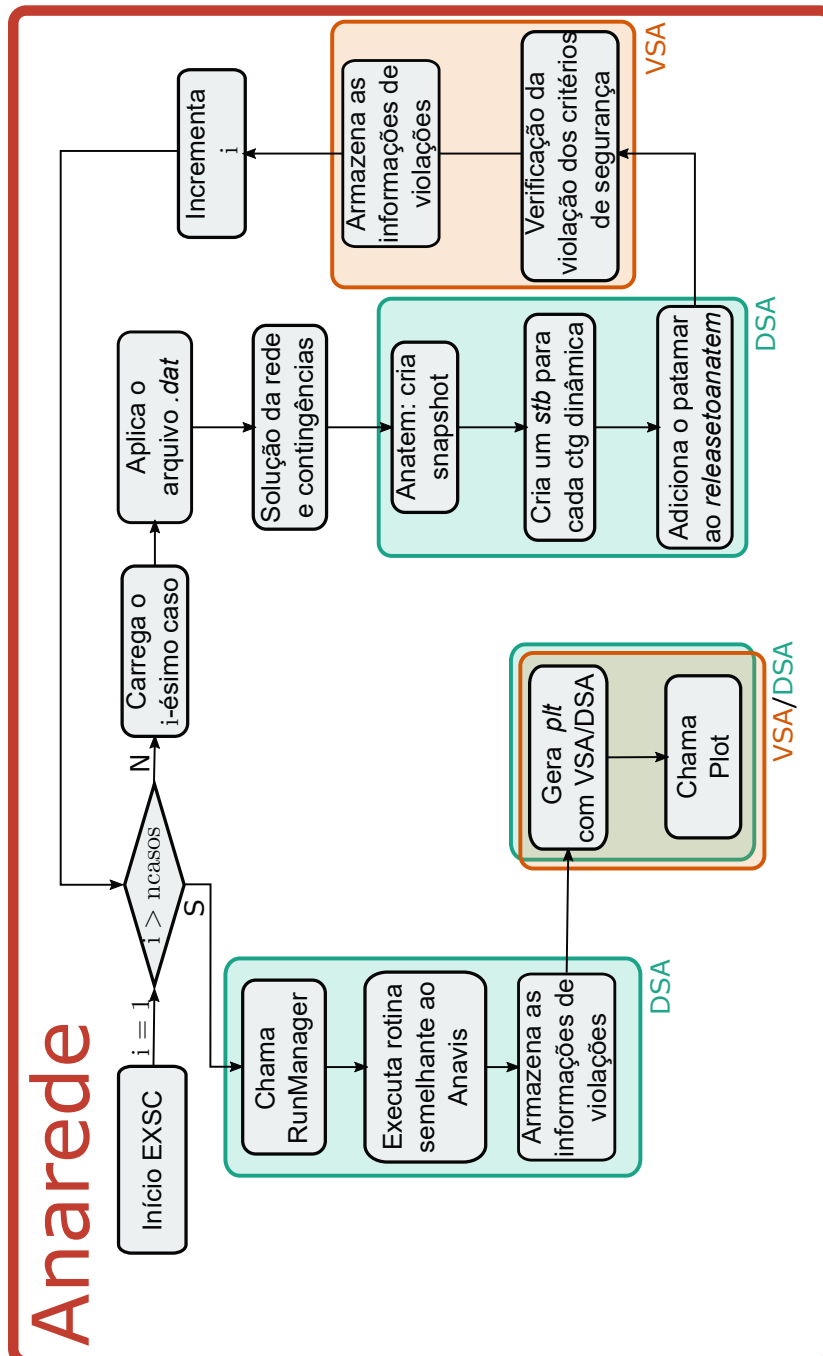


Figura 5.3: Fluxo de dados no programa Anarede para a Simulação Cronológica

A parte VSA e DSA do algoritmo difere, em certo sentido, da ferramenta VSA/DSA da fig. 3.6 em relação às rotinas alheias ao Anatem e que são responsáveis pela concatenação das informações e geração de arquivo para visualização de resultados – enquanto que tradicionalmente pela ferramenta VSA/DSA este procedimento é realizado por programa externo, para a Simulação Cronológica, este procedimento é feito de maneira interna. Naturalmente, a rotina é a mesma, *por design*, da ferramenta de Fluxo Continuado com Informação de Segurança.

Novamente, a vantagem em se adotar tal abordagem está no ganho automático da ferramenta de análise de segurança dinâmica: para o Anatem, é completamente indiferente o tipo de ferramenta que o está chamando.

O arquivo de resultados *simcron.plt* gerado pela ferramenta deverá apresentar as variáveis sistêmicas monitoradas e a informação de segurança de cada patamar. Como a implementação de monitoração dessas variáveis não é o foco do trabalho, implementou-se apenas a monitoração da carga ativa do sistema. As informações de segurança são divididas em dois grupos, separadas pelos cabeçalhos **SIMCRON_VSA** e **SIMCRON_DSA**, conforme a fig. 5.4. O conjunto de informações é idêntico ao da seção 4.3.

```

SIMCRON_VSA
(volt) (flux) (mvar) (lseg) ( nc ) (      identificacao da configuracao pior      )
  0    0    0    0    0
  0    0    0    0    0
  0    0    0    0    0
  0    2    0    2    0 Caso Base
  0    1    0    1    0 LT_4_6_1
  1    2    0    3    0 LT_4_6_1
  2    2    0    4    0 LT_4_6_1
  2    2    0    4    0 LT_4_6_1
  4    5    0    9    3 LT_4_6_1
  6    7    0   13    5 LT_4_6_1
  0    2    0    2    0 Caso Base
  0    0    0    0    0

SIMCRON_DSA
(volt) (flux) (mvar) (lseg) ( nc ) (      identificacao da configuracao pior      )
  0    0    0    0    0
  0    0    0    0    0
  0    0    0    0    0
  0    1    0    1    0 Caso Base
  0    0    0    0    0
  1    1    1    2    5 ABERTURA DA LT 4 - 6 [1]
  1    1    1    2    5 ABERTURA DA LT 4 - 6 [1]
  1    1    1    2    5 ABERTURA DA LT 4 - 6 [1]
  2    2    1    4    5 ABERTURA DA LT 4 - 6 [1]
  3    3    1    6    5 ABERTURA DA LT 4 - 6 [1]
  0    1    0    1    0 Caso Base
  0    0    0    0    0

```

Figura 5.4: Exemplo de trecho de um arquivo .plt oriundo do SimCron

5.3 Implicações da Simulação Cronológica para o Anatem

Embora se tenha dito que, na teoria do algoritmo, é indiferente para o Anatem a ferramenta pela qual ele está sendo chamado (VSA/DSA, PVRS ou SimCron), no uso prático do programa esta assertiva não se mostra necessariamente verdadeira.

Tradicionalmente, uma simulação no Anatem requeria que os dados dinâmicos fossem tratados e ajustados para o caso a ser simulado; portanto, tal característica era impeditiva para a simulação sequencial de casos distintos. Esta consideração se deve à restrição imposta por alguns fundamentos empregados na concepção do programa, como a exigência do usuário informar apenas os dados necessários para a simulação. Em dado momento, houve também a necessidade da viabilização da simulação dinâmica de casos oriundos do tempo real[60], e então tais fundamentos foram revistos. Assim, os recursos a seguir foram propostos e implementados pela equipe de desenvolvimento do Anatem[61] de maneira a facilitar a simulação no Anatem sem que o usuário precise intervir no banco de dados.

5.3.1 Preparação de Casos para Simulação no Anatem

Os casos de estabilidade para simulações no Anatem, em sua preparação tradicional, precisam contemplar uma certa interface entre a associação de modelos dinâmicos dos equipamentos e os elementos existentes na rede elétrica do caso do Anarede. Esta interface requer, por exemplo, que sejam apagados registros do arquivo de texto do Anatem que contenham informações de dinâmicas inexistentes.

Deve-se considerar também, na preparação dos casos de estabilidade, a adequação dos CDUs (Controles Definidos pelo Usuário) à configuração topológica da rede elétrica. Nos casos em que há a medição de algum sinal de um local remoto (e.g. uma barra ou circuito) e este elemento está ausente do caso, deve-se alterar o CDU, removendo-se a malha referente à atuação deste sinal.

Visando otimização do esforço computacional, os casos de estabilidade do Anatem geralmente são montados com o modelo de geração equivalente. As barras de geração para o estudo de regime permanente fazem uso do modelo clássico de barra PV, requerendo que os números de unidades das máquinas associadas a essas barras sejam informadas *a posteriori*. Quando se faz um estudo elétrico, utiliza-se um programa auxiliar (Anat0) cujo objetivo reside na determinação da quantidade de unidades dessas máquinas que estão ligadas para um dado ponto de operação, segundo um critério de inércia mínima³; no caso oriundo do tempo real, em parti-

³o critério de inércia mínima determina que o despacho nas usinas seja feito pelo menor número de máquinas possível, com o objetivo de avaliar casos de estabilidade mais severos

cular, a quantidade de máquinas que estão ligadas já é conhecida pelo SAGE. Para ambas as situações, esses números precisam ser informados do conjunto de dados de máquina do Anatem (DMAQ); exige-se, portanto, que para cada ponto de operação (ou caso distinto), haja um conjunto de dados específico.

Estes procedimentos representam um tempo considerável na preparação dos casos, exigem o conhecimento do programa Anatem e são particulares para cada configuração da rede elétrica. As etapas tradicionais no ajuste de casos de estabilidade estão detalhadas no fluxograma apresentado na fig. 5.5.

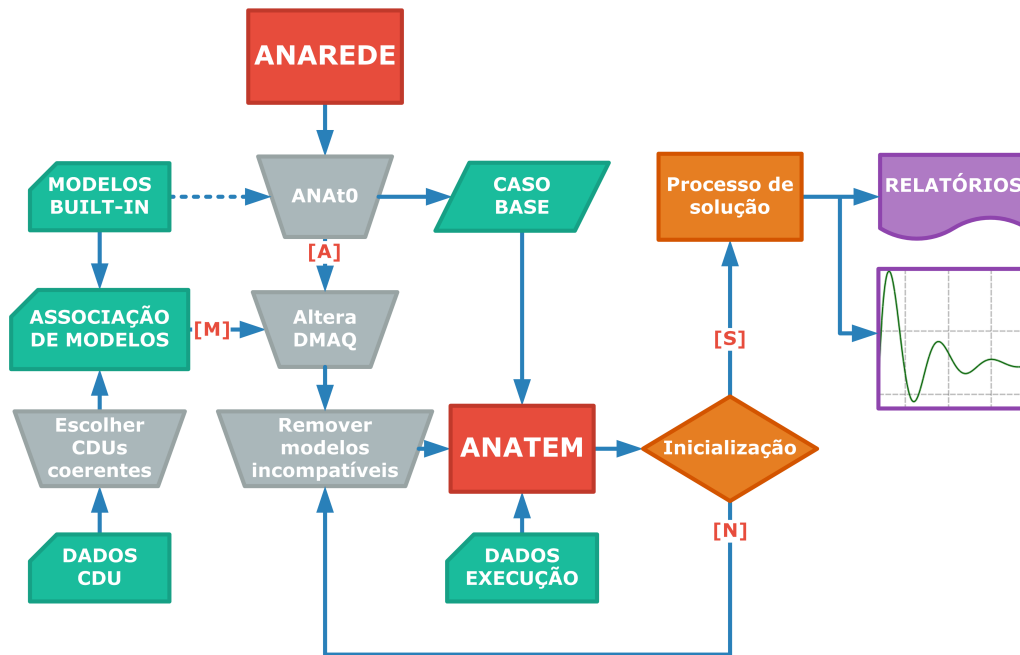


Figura 5.5: Etapas tradicionais no ajuste de casos de estabilidade do Anatem

De maneira simplificada, um caso de fluxo de potência do Anarede, com modelo de geração equivalente, deve ser processado pela ferramenta auxiliar Anat0. Esta ferramenta preencherá o arquivo que contém o DMAQ com a informação da quantidade de máquinas em cada barramento, o fator de participação de cada grupo de máquinas e também altera a reatância equivalente dos transformadores associados.

Deve-se então associar às essas máquinas com controladores (que podem ser *built-in* ou CDU) cuja topologia seja apropriada para o caso em questão, bem como outros modelos que possuam correspondentes estáticos no caso, como conversores de corrente contínua, relés de circuito e barramento, controles centralizados, etc.

O caso tendo sido ajustado, pode-se então informar os parâmetros de simulação: variáveis a serem plotadas; método numérico de solução; tempo máximo de simulação; e eventos a serem aplicados.

Se o caso apresentar inicialização viável, os resultados serão produzidos na forma de relatórios e curvas. Do contrário, será necessário manipular novamente os arquivos do caso (e.g. corrigindo o despacho das máquinas ou desligando controles).

5.3.2 Interface entre os Dados Estáticos e Dinâmicos

Em virtude de cenários de carga, geração e disponibilidade de circuitos, há a possibilidade de se encontrar variações na topologia do SIN. Em particular, nos casos exportados pelo SAGE, ocorrem situações em que máquinas ou barras apresentam-se com estado operativo ligado ou desligado em função da configuração da rede.

Cada usina do SIN, modelada no Anatem, possui um registro DMAQ, onde se define o modelo dinâmico da máquina e seus controladores. Tradicionalmente, só se era permitido fornecer modelos de máquinas para usinas existentes no caso de fluxo de potência. Assim, na ausência de uma usina, era preciso remover o seu registro. Para casos de planejamento, em que era preciso utilizar a ferramenta Anat0, não era um problema essa particularidade, pois o próprio Ana0 lidava com essa situação. Contudo, impossibilitava que um mesmo DMAQ definido previamente fosse utilizado para mais de um caso: ou seja, um único conjunto de arquivos de estabilidade do Anatem fosse utilizado em diferentes casos.

Além das máquinas síncronas, diversos equipamentos compartilham do mesmo empecilho para a simulação de casos distintos, entre eles estão compensadores estáticos, capacitores série controlados, fontes *shunt* controladas por CDU e elos CC.

Desenvolveu-se a Opção de Controle de Execução IERR para flexibilizar o uso do banco de dados dinâmico. Através desta opção, as linhas do arquivo de estabilidade que fazem referência a elementos inexistentes no caso são automaticamente ignoradas, permitindo executar a simulação sem a manipulação dos dados dinâmicos. No caso de um dado dinâmico ser inserido sem correspondente no caso do fluxo de potência, com esta opção ativa, uma mensagem de aviso é lançada para o usuário no relatório de simulação, conforme a fig. 5.6.

```
*** AVISO INPMAQ-970 ***
ATENCAO! Opção IERR ativada. Erros não severos não interromperão a execução,
porem dados correspondentes serão desconsiderados.

DADOS DE MAQUINA SINCRONA

X-----X--X----X---X-----X-----X-----X-----X-----X
  Barra      No Pg(%) No  Maq   Exc   Vel   Est   Reat Barra
  Num      Nome   Gr Qg(%) Un  Mod   Mod T Mod T Mod T Xvd  Contr
X-----X-----X--X----X---X-----X-----X-----X-----X

*** ERRO IGNORADO INPMAQ-110 ***
Numero de barra inexistente.
  9446              10                125   119U   163U   183U

*** ERRO IGNORADO INPMAQ-110 ***
Numero de barra inexistente.
  9034              10                300   9034U
```

Figura 5.6: Mensagens no relatório do Anatem para elementos ignorados no caso

5.3.3 Geradores Individualizados, Número de Máquinas e Fator de Participação

O Anatem, tradicionalmente, realiza a leitura do número de unidades em operação através do Código de Execução DMAQ, conforme ilustrado na fig. 5.7. O preenchimento do número de unidades e dos fatores de participação de potência ativa e reativa por grupo era indispensável para a simulação de um novo caso de estabilidade: o primeiro era responsável por determinar, dentre outras coisas, a inércia equivalente do grupo gerador; enquanto que os demais diziam respeito ao quanto que aquele grupo contribui para a geração ativa e reativa da barra PV em questão.

DMAQ											
(Nb)	Gr	(P)	(Q)	Und	(Mg)	(Mt)u	(Mv)u	(Me)u	(Xvd)	(Nbc)	
3014	10	100	100	1	5800	5800u	5840u	5870u		3014	SERRAFAC-1GR
7050	10	50	50	4	6000	6000u	6040u			7050	SANTO-MD-4GR
7050	20	50	50	4	6000	6001u	6041u			7050	SANTO-MD-4GR
7064	10	50	50	7	6000	6002u	6042u			7064	SANTO-ME-7GR
7064	20	50	50	7	6000	6003u	6043u			7064	SANTO-ME-7GR
7062	10	67	67	2	6000	6004u	6044u			7062	SANTO-LE-2GR
7062	20	33	33	1	6000	6005u	6045u			7062	SANTO-LE-1GR
7051	10	100	100	13	6100	6100u	6140u			7051	JIRAU-MD13GR

Figura 5.7: Dados de associação de modelos de máquinas e controladores

O preenchimento destes campos usualmente é realizado pelo Anat0 baseado no uso do critério da inércia mínima. Contudo, para casos oriundos do tempo real (por exemplo), tal critério não é necessariamente válido; pois o critério da inércia mínima é uma definição para estudos de estabilidade, com o objetivo de representar uma configuração menos favorável à estabilidade.

O recurso de Gerador Individualizado (DGEI) do Anarede permite definir grupos geradores (e a quantidade de máquinas ligadas neste grupo) que alimentam uma barra de geração. É pelo uso deste recurso que o SAGE exporta os seus casos, por exemplo. O DGEI, em seu processo de solução, pode atualizar ou não o número de unidades de maneira a respeitar o critério de inércia mínima (a escolha do usuário).

Dessa forma, implementou-se no Anatem a Opção de Controle de Execução DGEI, que ao ser utilizada junto com o código DMAQ, realiza a leitura do número de unidades de geradores do DGEI do Anarede. Além disso, os fatores de participação de potência ativa e reativa por grupo de geradores passam a ser calculados pelo programa, dispensando o seu preenchimento. É necessário, apenas, que a numeração da barra e do grupo de gerador do caso de fluxo de potência seja coincidente com aquela informada no DMAQ, conforme a fig. 5.8.

DMAQ	IERR	DGEI	(Nb)	Gr (P) (Q)	Und (Mg)	(Mt)u	(Mv)u	(Me)u	(Xvd)	(Nbc)
3014	10				5800	5800u	5840u	5870u		3014 SERRAFAC-1GR
7050	10				6000	6000u	6040u			7050 SANTO-MD-4GR
7050	20				6000	6001u	6041u			7050 SANTO-MD-4GR
7064	10				6000	6002u	6042u			7064 SANTO-ME-7GR
7064	20				6000	6003u	6043u			7064 SANTO-ME-7GR
7062	10				6000	6004u	6044u			7062 SANTO-LE-2GR
7062	20				6000	6005u	6045u			7062 SANTO-LE-1GR
7051	10				6100	6100u	6140u			7051 JIRAU-MD13GR

Figura 5.8: Dados de associação de modelos de máquinas e controladores com as opções DGEI e IERR

Através do uso da Opção Controle de Execução DGEI, é permitido que o somatório dos fatores de participação ativa e reativa não totalizem 100%; neste caso, complementa-se a geração remanescente com uma impedância negativa.

5.3.4 Conversão Automática de Sinais de Exportação em Sinais de Saída

O Anatem sendo capaz de ignorar entradas sem correspondentes no caso do Anarede e não precisando preencher os campos de fatores de participação e quantidade de unidades de máquinas, resta apenas uma situação ainda a ser tratada para que o código DMAQ possa ser utilizado de maneira universal: controladores que dependem da topologia do sistema.

Em algumas máquinas, há duplicata da entrada do registro de entrada, com a diferença de algum controlador. Para ilustrar esta circunstância, será considerada a UTE TermoNorte II de ciclo combinado, que possui dois modelos de reguladores de velocidade na base de dados dinâmicos do ONS, como o caso da fig. 5.9. A definição de qual modelo utilizar depende se a usina está operando em ciclo simples ou combinado no caso de fluxo de potência.

(Nb)	Gr (P) (Q)	Uni (Mg)	(Mt)u	(Mv)u	(Me)u	(Xvd)	(Nbc)
(UTE TermoNorte II - Gas							
(-> Se operando em ciclo combinado							
6912	10	4702	4702u	4742u	4772u		
(-> Se operando em ciclo simples							
6912	10	4702	4702u	94742u	4772u		
(UTE TermoNorte II - Vapor							
6913	10	4703	4703u	4743u	4773u		

Figura 5.9: Dados de associação de modelos e controladores da UTE TermoNorte II

A diferença entre os CDUs dos reguladores de velocidade nas configurações de ciclo simples e combinado consiste no fato de que quando a usina trabalha em ciclo combinado ocorre exportação de sinal da máquina a gás para a máquina a vapor

através do bloco EXPORT, conforme ilustra a fig. 5.10a. No entanto, quando esta usina opera em ciclo simples não ocorre a importação deste sinal devido à ausência da máquina a vapor. Logo, deve ser utilizado outro regulador de velocidade para esta usina, no qual é feita a substituição do bloco EXPORT pelo bloco SAIDA(fig. 5.10b).

(CRIACAO DO VAPOR NA CALDEIRA DE RECUPERACAO					
0710	LEDLAG	Wx	VAP0	1.0	1.0#TM
0711	LEDLAG	VAP0	VAP	1.0	1.0#TB
0712	EXPORT	CDU	VAP		

(a) CDU 4742: exportação quando há máquina a vapor no caso

(CRIACAO DO VAPOR NA CALDEIRA DE RECUPERACAO					
0710	LEDLAG	Wx	VAP0	1.0	1.0#TM
0711	LEDLAG	VAP0	VAP	1.0	1.0#TB
0712	SAIDA		VAP		

(b) CDU 94742: saída quando não há máquina a vapor no caso

Figura 5.10: Diferença entre os CDUs 4742 e 94742 do banco de dados do ONS

A intervenção do usuário no sentido de habilitar o registro de associação correspondente à configuração da usina no caso que está sendo estudado foi incorporada pelo Anatem através da conversão automática de blocos EXPORT em SAIDA caso seja necessário. Isto ocorrerá sempre que o local de exportação não existir no caso ou não apresentar IMPORT correspondente. Os blocos EXPORT convertidos em SAIDA serão informados no relatório de resultados do programa conforme o exemplo da fig. 5.11.

```

*** AVISO CDUINT-620 CDU 9300 BLOCO 4502 ***
Bloco EXPORT para CDU sem bloco IMPORT correspondente. Bloco será convertido
em bloco SAIDA.

*** AVISO CDUINT-620 CDU 9300 BLOCO 4503 ***
Bloco EXPORT para CDU sem bloco IMPORT correspondente. Bloco será convertido
em bloco SAIDA.

*** AVISO CDUINT-620 CDU 9300 BLOCO 4005 ***
Bloco EXPORT para CDU sem bloco IMPORT correspondente. Bloco será convertido
em bloco SAIDA.

*** AVISO CDUINT-620 CDU 9300 BLOCO 4006 ***
Bloco EXPORT para CDU sem bloco IMPORT correspondente. Bloco será convertido
em bloco SAIDA.

```

Figura 5.11: Mensagem no relatório do Anatem para blocos EXPORT convertidos em SAIDA

5.3.5 Definição de Valor Padrão para Sinais Oriundos de Locais Remotos de Medição

Os controladores definidos pelo usuário podem realizar medições de sinais da rede elétrica e enviar sinais de controle aos equipamentos. Esta interface entre controles

e rede elétrica ocorre através de blocos `IMPORT` e `EXPORT`, para medição e envio de sinais, respectivamente.

O local de importação ou exportação do sinal pode ser o próprio equipamento ao qual pertence o CDU, ou pode ser determinado via local remoto de medição, usando o Código de Execução `DLOC`.

Tradicionalmente, o Anatem realiza crítica sobre locais remotos de medição inexistentes no caso de fluxo de potência. Por exemplo, se em um caso específico uma barra estivesse desligada e no banco de dados existisse uma medição de tensão deste local, ocorreria erro de simulação. Para solucionar este problema, o controlador deveria ser modificado, removendo toda a malha de controle existente a partir deste sinal.

Para viabilizar a simulação, sem a manipulação da base de dados, foi adicionado um novo campo (parâmetro `P2`) ao bloco `IMPORT` onde deve ser fornecido um valor padrão a ser adotado pelo sinal na ausência do seu local de medição. No caso de uma tensão, por exemplo, o valor padrão poderia ser preenchido com zero. A fig. 5.12 apresenta um exemplo de utilização do parâmetro `P2`, neste caso a ausência do local remoto 100 fará com que o número de unidades de geradores em operação (subtipo `NUGER`) adotado pela variável `NU1` seja zero, conforme definido pelo parâmetro `P2`.

```
(nb)i(tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax)
2034 IMPORT  NUGER          NU1    100    0
```

Figura 5.12: Exemplo de utilização do parâmetro `P2` do bloco `IMPORT`

Além do bloco `IMPORT`, o uso do registro `DEFVAL` poderia apresentar empecilho semelhante. O registro `DEFVAL` é a estrutura utilizada para fornecer valor inicial a uma determinada variável de CDU. Este valor inicial pode ser dado através de valores fixos ou de sinais medidos da rede elétrica (tensão, potência elétrica, número de unidades de geradores em operação). Utilizam-se locais remotos de medição (através do código `DLOC`) para a definição de valor inicial de variável a partir de grandezas da rede elétrica.

A ausência de um local remoto de medição em uso no `DEFVAL` caracteriza um erro de simulação, portanto, foi adicionado o parâmetro `D2` neste registro, com a finalidade de fornecer valor inicial para a variável na ausência do seu local de medição. A fig. 5.13 indica que na ausência do local de medição 100 a potência elétrica (subtipo `PELE`) adotada pela variável `Pe1-0` será zero, conforme definido pelo parâmetro `D2`.

```
(EFVAL (stip) (vdef) ( d1 ) ( d2 )
DEFVAL  PELE  Pe1-0  100    0
```

Figura 5.13: Exemplo de utilização do parâmetro `D2` do `DEFVAL`

Tais recursos permitem que, por exemplo, o Master Control (responsável pelo controle supervisorio dos bipolos que escoam a energia gerada pelas usinas do Rio Madeira e o *Back-to-Back* de Porto Velho[1]) seja capaz de ser generalizado, dispensando múltiplas versões do mesmo controle, que são escolhidas de acordo com a configuração topológica do caso. As figs. 5.12 e 5.13 são exemplos retirados do Master Control.

5.3.6 Controladores com Inicialização Inviável

Os controladores representados através de CDU realizam medições de sinais da rede elétrica e inicializam todas as variáveis do controle considerando o regime permanente, especificado pelo ponto de operação do caso de fluxo de potência. A inicialização dos CDUs se dá a partir das variáveis conhecidas na direção das variáveis desconhecidas previamente. As variáveis conhecidas são aquelas importadas da rede elétrica, como as tensões das barras, as potências dos geradores, a frequência do sistema, enquanto as desconhecidas são todas as outras variáveis de entrada e saída dos blocos do controle, assim como as variáveis internas das máquinas, conversores e demais equipamentos. No instante inicial da simulação, todas as variáveis do controle devem ser determinadas para que inicialização deste seja viável.

Em estudos de planejamento e operação é necessário pesquisar as causas dos problemas de inicialização de CDU, adequando o ponto de operação aos controladores do caso que está sendo estudado, enquanto que nas simulações de casos oriundos do tempo real, pretende-se realizar simulações dinâmicas considerando todos os controladores possíveis de serem inicializados, abdicando, assim, da dinâmica dos controladores não inicializados por problemas de compatibilidade entre modelos de controladores e ponto de operação.

Com a finalidade de realizar simulações de casos de tempo real com uma base de dados dinâmicos única, implementou-se a Opção de Controle de Execução DCNI para desligar os controladores não inicializados. A opção DCNI pode ser utilizada para desligar os controladores de máquinas síncronas e de compensadores estáticos. No caso da máquina síncrona apenas será desligado o controle não inicializado, ou seja, se em uma usina específica o seu regulador de velocidade não for inicializado, mas os reguladores de tensão e estabilizador apresentarem inicialização viável, esta usina terá apenas o seu regulador de velocidade desligado.

Ao término da simulação é gerado um relatório informando os controladores que foram desligados por problemas de inicialização de CDU, viabilizando a ponderação, por parte do analista que está realizando o estudo, da relevância dos controles desligados na resposta desejada e a correção dos problemas de inicialização. A seguir é apresentado o relatório de controladores desligados por problemas de inicialização

da simulação do caso exportado no dia 26 de fevereiro de 2016 às 07:30 h.

RELATORIO DE CONTROLADORES DESLIGADOS POR PROBLEMAS DE INICIALIZACAO DE CDU					
Barra	Grupo	Nome Da Barra	Modelo	Tipo Controle	Num
400	30	HBORD-88	402	REG. TENSAO	402
808	10	GJRicha-	702	RG.VELOCIDADE	746
1175	10	PReal---	1004	RG.VELOCIDADE	1048
5520	10	BOAESP-1	1210	RG.VELOCIDADE	1266
6831	10	UHRONDII	4706	RG.VELOCIDADE	4746

Figura 5.14: Mensagens no relatório do Anatem para controladores não inicializados

Tal recurso também mostra seu valor em simulações para casos de planejamento. Frequentemente, usinas pouco expressivas ou que distam da região de interesse apresentam problemas de inicialização.

5.3.7 Problemas de Convergência

O Anatem utiliza o método alternado para a solução iterativa dos sistemas de equações algébricas e diferenciais das redes CA e CC. Deste modo, a rede elétrica é representada por uma matriz de admitâncias nodais e os elementos conectados à rede são representados por injeções de corrente.

O método alternado de solução pode apresentar problemas de convergência durante a solução dos subsistemas CA-CC de maneira não simultânea, principalmente em períodos críticos da simulação, em que são necessárias muitas iterações para a solução destes subsistemas[62].

Tais problemas de convergência, em termos práticos, significam no término prematuro da simulação. Muitas vezes, pode-se contornar esses problemas de convergência com o uso de Opções de Execução, ou mudança no passo de simulação. Para uma ferramenta que se propõe a simular sequencialmente diversos casos distintos, a partir de um único caso de estabilidade, uma maior robustez na simulação (do ponto de vista que é garantido que a simulação chegará ao fim) é desejado. De forma a suprir essa necessidade, criou-se algumas Opções de Execução.

Comutação Automática para o Método de Newton na Solução da Rede CA

O método de Newton para a solução da rede CA é geralmente mais robusto que o convencional quando próximo à solução, possui taxa de convergência quadrática

e, portanto, requer menor número de iterações no processo de solução. Desde a versão 10.5 do Anatem, existe a possibilidade de utilizar o método de Newton para a solução da rede CA fazendo uso da Opção de Controle de Execução NEWT junto ao Código de Execução EXSI.

No entanto, este método torna a simulação consideravelmente mais demorada, devido ao esforço computacional demandado por este na reconstrução da matriz Jacobiana a cada iteração do processo de solução da rede CA.

Dessa maneira, era indicada a utilização da opção NEWT em períodos críticos de simulação, ou seja, nas situações em que o método convencional viesse a falhar. Verificou-se, ainda, que habilitar a opção NEWT exatamente no instante da simulação em que o método convencional deixa de convergir, permite a continuidade da simulação de casos com solução viável pelo método de Newton.

Buscando a flexibilidade de lançar uso da opção NEWT sem a necessidade de manipular o arquivo de dados e não comprometendo o tempo de simulação, criou-se a funcionalidade de comutação automática para o método de Newton na solução da rede CA.

Portanto, sempre que ocorrer a não convergência dos processos iterativos de solução CA-CC, ou simplesmente a não convergência da rede CA, o Anatem utilizará automaticamente o método de Newton para a solução da rede CA durante 100 passos de simulação (fig. 5.15), visando não comprometer o tempo total de simulação. Assim, depois dos 100 passos de simulação com o método de Newton, a solução volta a transcorrer com as opções de solução definidas pelo usuário.

```
*** AVISO ESTSOL-100 ***  
T= 0.5340s  
Número máximo de iterações excedido no processo alternado de solução CA-CC.  
  
*** AVISO ESTSOL-125 ***  
T= 0.5340s  
A opção de execução NEWT será ativada automaticamente.
```

Figura 5.15: Mensagens no relatório do Anatem para a comutação automática para Newton

Opções de Execução SADD e DLCC

Em algumas situações, não é possível para o Anatem encontrar uma solução tal que, para um dado instante t , redes CC e CA e modelos CC e CA apresentem, simultaneamente, erro relativo abaixo da constante de convergência.

Em situações do tipo, o usuário experiente costuma simular durante um breve período de tempo com a Opção de Execução SADD e/ou DLCC ativada, para depois retornar à simulação sem essa opção ativada.

Considere o processo de solução iterativo do Anatem descrito na fig. 5.16.

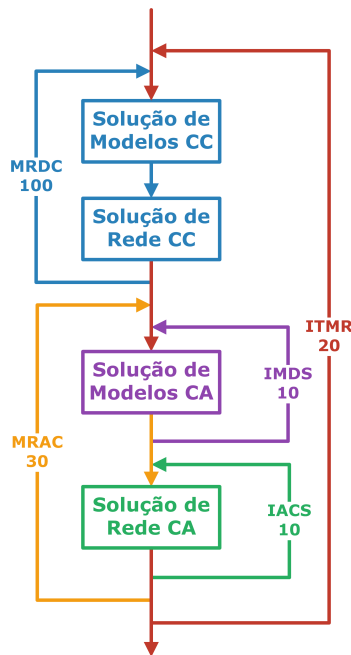


Figura 5.16: Fluxograma do processo iterativo do Anatem

O efeito da opção **SADD** sobre o fluxograma da fig. 5.16 está na abertura do laço de realimentação representando pela constante **ITMR**. Ou seja, o programa não verifica a influência da alteração na rede CA para a solução da rede CC para um dado instante t , bastando que, individualmente, a rede CA e a rede CC tenham solução, o instante t será considerado solucionado.

A opção **DLCC** apresenta efeito prático semelhante, dentro do conjunto rede+modelos CC. Dentro desse conjunto, esta opção provoca um desacoplamento temporal entre a solução da rede CC e dos modelos CC; mais especificamente, a rede CC considera a solução $t - \Delta t$ dos modelos CC. Desta maneira, o laço comandado pela constante **MRDC** tende a apresentar convergência em menos iterações.

Como tais opções podem introduzir erros, a aplicação de ambas as opções tendem a ser pelo mínimo de tempo possível. Contudo, a opção **DLCC** tende a ser menos severa e, por vezes costuma ser aplicada durante toda a simulação, caso seu uso se faça necessário em algum momento.

Opções de Execução SAD2 e SAD3

Num contexto em que o usuário precise interferir o mínimo o possível, o uso da opção **SADD** se torna desfavorável. Ou é preciso que esta opção fique ativada por tempo demais ou corre-se o risco da simulação encerrar prematuramente.

Criou-se, então, a Opção de Execução **SAD2**, cujo objetivo é aplicar o efeito da opção **SADD**, quando necessário. Com essa opção ativada, quando o Anatem apresenta problema de iteração CA-CC, ativa-se o efeito da opção **SADD** por 10 milissegundos. Desta maneira, diminui-se o acúmulo de erro que a quebra da realimentação acar-

reta na simulação, mas se permite que haja uma simulação, com erro praticamente desprezível.

Por outro lado, existem alguns casos em que são necessárias muitas iterações em cada um dos laços do Anatem. São casos geralmente estressados, em que existem muitos intervalos de tempo que requerem SADD ou o método de Newton. Quando isso acontece, o tempo computacional para simular o caso é elevado.

Com a opção SAD3, o Anatem simulará a maior parte do tempo com SADD, fazendo um laço com a iteração CA-CC completa a cada 10 milissegundos. O tempo computacional pode cair drasticamente e o erro inserido pela quebra da realimentação é dirimido ao se aplicar a realimentação com alguma frequência.

A fig. 5.17 mostra o efeito das opções SADD, SAD2, SAD3 e DLCC sobre o algoritmo iterativo de solução utilizado no Anatem referente à fig. 5.16.

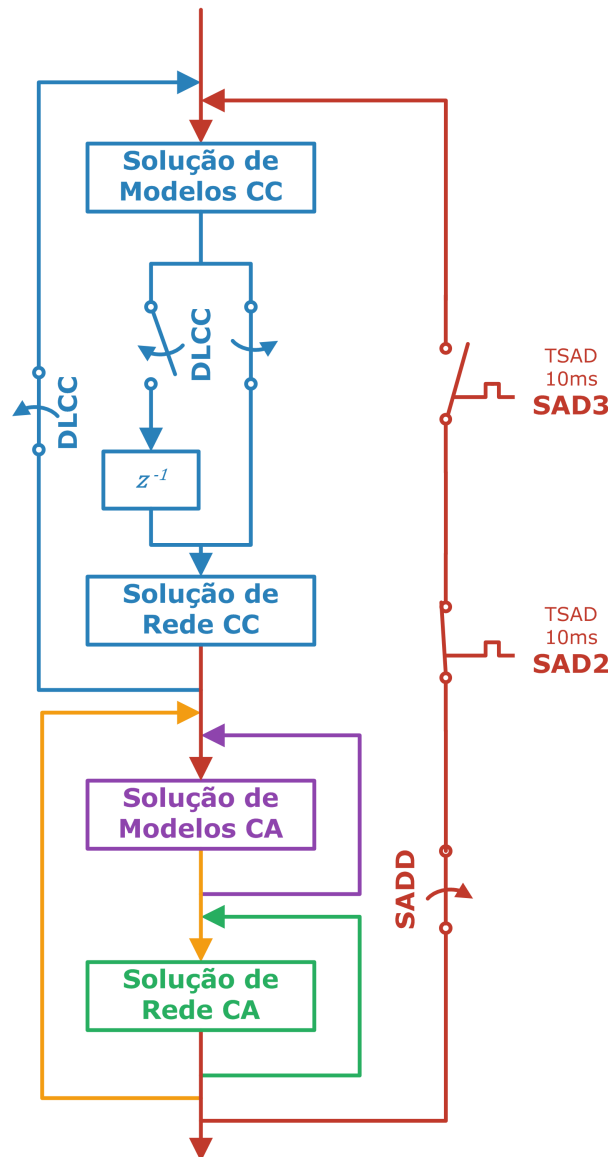


Figura 5.17: Fluxograma do processo iterativo do Anatem considerando opções para melhoria de convergência

Para efeito ilustrativo, comparou-se dois casos (A e B) com o uso e sem o uso da opção **SAD3**. Nestes casos, era necessário o uso da opção **SAD2** para a simulação completa, pois em alguns trechos havia problema de iteração CA-CC. Para o caso B, mais problemático, também se traçou a diferença das frequências encontradas na usina de Itaipu para o caso sem **SAD3** e com **SAD3** (fig. 5.18). O método de solução utilizado em todos os casos foi o DNWT.

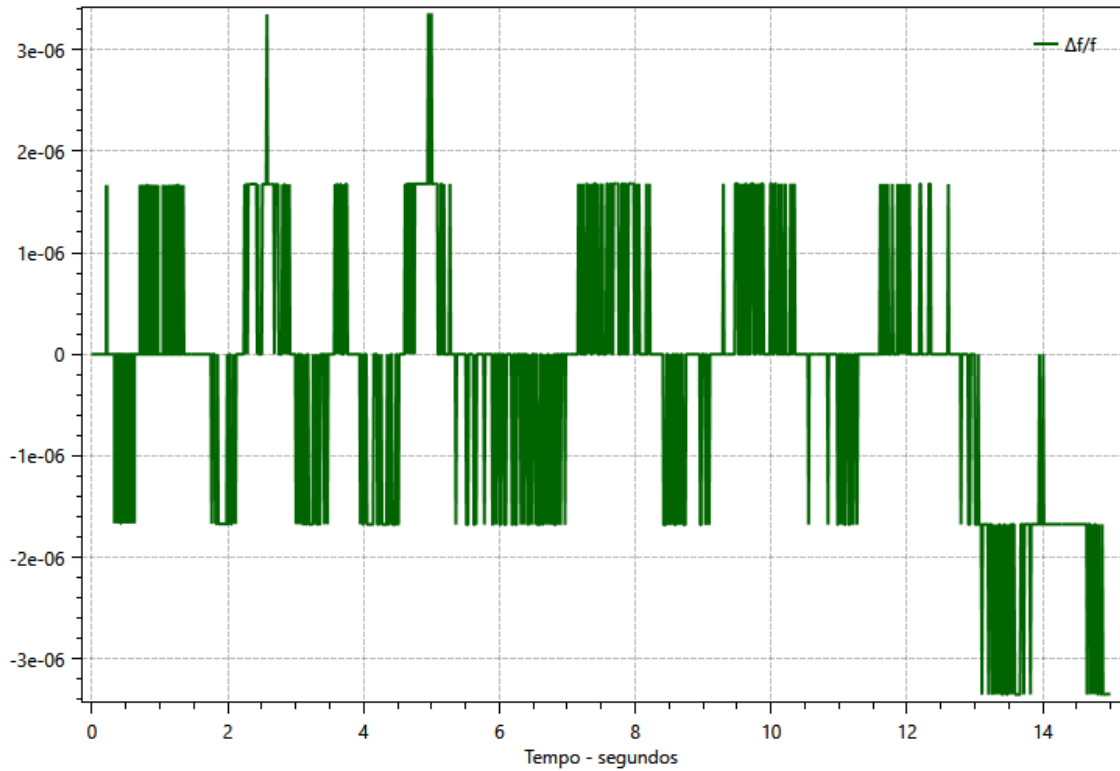


Figura 5.18: Erro obtido ao comparar o efeito da opção **SAD3**

Pode-se observar que o erro ocasionado pelo uso da opção **SAD3** é bastante reduzido, estando dentro dos limites esperados para um solucionador numérico. A tabela 5.1 mostra a diferença no tempo computacional com o uso desta opção.

Tabela 5.1: Efeito da opção **SAD3** sobre o tempo computacional

Caso/Modo	Sem SAD3	Com SAD3
A	00:04:59.80	00:03:24.65
B	00:20:20.54	00:07:16.29

Conclusão Acerca do Novo Paradigma do Anatem

Fazendo uso dos recursos descritos nesta subseção, a preparação de um arquivo de estabilidade para avaliar a segurança dinâmica de um sistema é bastante simplificada.

De fato, pode-se reduzir o fluxograma apresentado na fig. 5.5 para o fluxograma da fig. 5.19.

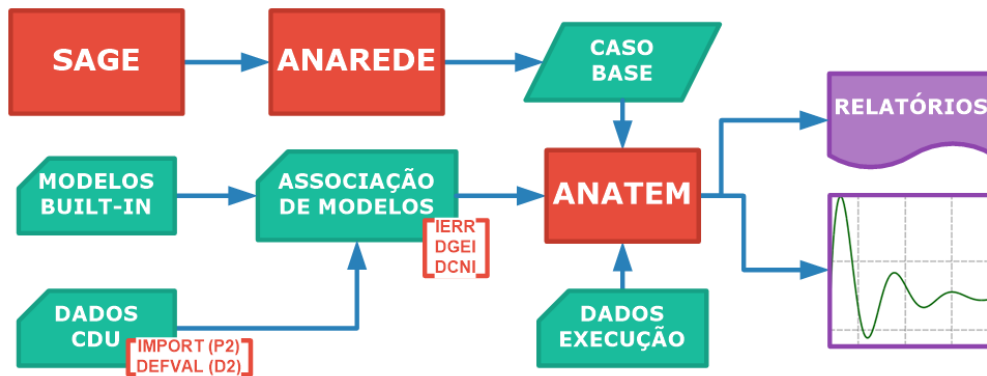


Figura 5.19: Etapas para a simulação de casos de estabilidade do Anatem com novos recursos

Com esta nova filosofia do Anatem, tanto para o usuário experiente quanto para o usuário iniciante, o uso do programa se torna facilitado ao ponto de requerer pouca ou nenhuma manipulação nos arquivos de dados dinâmicos.

No âmbito do projeto Reger (Rede de Gerenciamento de Energia)⁴ foi desenvolvida pelo Cepel, no ambiente do SAGE, uma ferramenta para exportação de casos de fluxo de potência representando o Sistema Interligado Nacional em Tempo Real que fossem adequados para realizar simulações dinâmicas.

Durante uma janela de testes de alguns dias (e de maneira amostrada), verificou-se que os casos exportados pelo SAGE conseguiam ser simulados no Anatem sem qualquer intervenção do usuário na base de dados dinâmicos[60].

Considera-se, portanto, que as implementações foram bem sucedidas e que sem as tais, o uso da ferramenta SimCron para avaliação de segurança dinâmica estaria severamente comprometido.

5.4 Simulação Cronológica com Informação de Segurança

Para a avaliação da ferramenta SimCron, considerou-se, novamente, dois sistemas: um caso simplificado (9 Barras) e um sistema que represente o SIN (obtido através da plataforma SAGE). A base de dados dinâmicos utilizada para o caso do SIN é referente ao caso de outubro de 2015 e se encontra disponível na página do ONS, na sessão de Casos de Referência de Transitórios Eletromecânicos[57].

⁴O Reger é o sistema SCADA/EMS (Supervisory Control and Data Acquisition System / Energy Management System) virtual do ONS. Esse sistema é composto por um conjunto de SSCs (Sistemas de Supervisão e Controle) fortemente integrados, geograficamente distribuídos e redundantes, cujo objetivo é dar suporte à operação em tempo-real do SIN.

Para um caso, a mudança nos patamares de operação será dada apenas pelo carregamento do sistema; para o outro, a diferença consiste tanto na carga, quanto da distribuição e na disponibilidade de circuitos e usinas. Para ambos, será mostrado a resposta esperada da ferramenta, em termos de como interpretar as regiões de segurança exibidas.

5.4.1 Exemplo 9 Barras

O caso “9 Barras” utilizado para a exemplificação da ferramenta SimCron é o mesmo da fig. 3.1. Será explorada a possibilidade da mudança do cenário de carga e geração dentro de um sistema.

Seja o espaço vetorial $S \in \mathbb{C}^3$ que define a carga complexa dos três barramentos do sistema. Seja também S_c um subespaço de $S \in \mathbb{C}^1$ que indica todos os valores possíveis que a carga pode assumir durante um intervalo de tempo, também conhecido como restrição de crescimento.

Amostrou-se, em uma janela de tempo arbitrária, valores possíveis de S seguindo a restrição imposta por S_c , traçando a relação da parte ativa do carregamento pelo tempo, sendo $\sum P_\ell = |\text{Re}[S]|_1$, conforme a fig. 5.20.

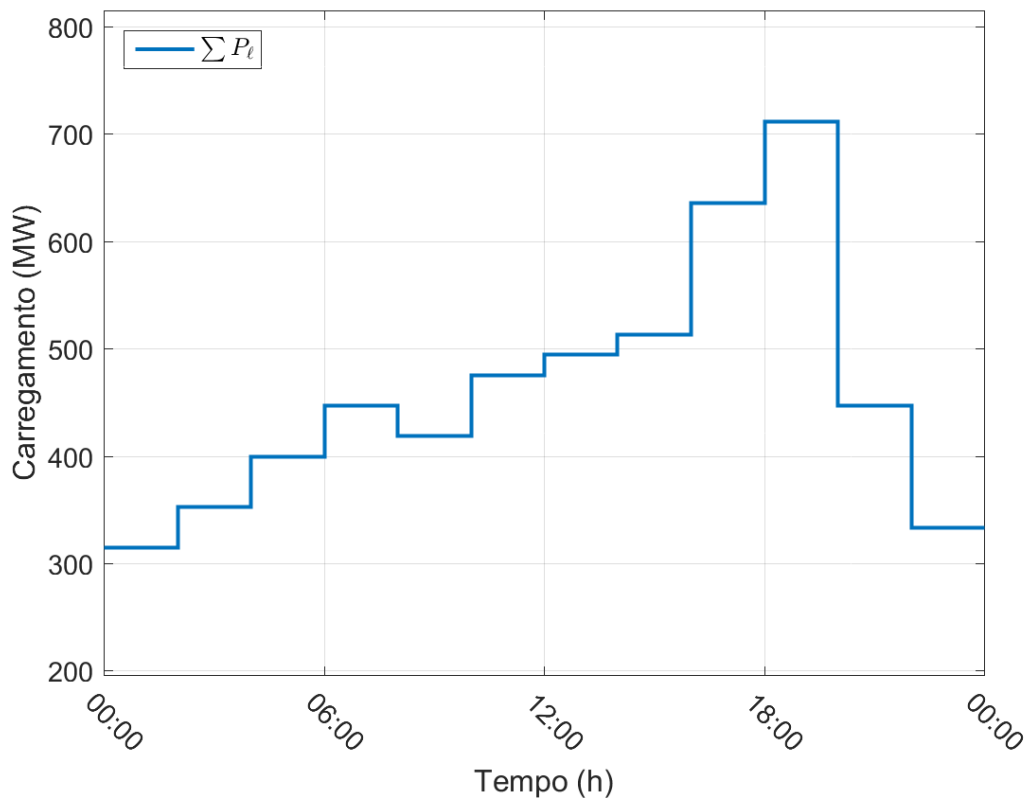


Figura 5.20: Curva de Carga para o caso 9 Barras

A variação temporal deste sistema, conforme mencionado, consiste apenas na variação da combinação carga-geração do sistema. Dado que o crescimento possui uma única direção, o efeito prático desta restrição pode ser compreendido como a adoção de fatores constantes de crescimento. Este tipo de crescimento é o mesmo observado em um sistema quando sujeito ao fluxo de potência continuado ou quando gerado a partir da ferramenta de incremento automático de carga ou curva de carga do Anarede.

Nesta concepção, espera-se que problemas de violação de carregamento e de tensão aconteçam de maneira monótona não-decrescente conforme há o aumento na carga. Naturalmente, tal perspectiva só é verificada como verdadeira quando não há outros controles sistêmicos atuando, principalmente controles com banda morta de atuação ou discretizado, como é o caso do controle de *taps* de transformadores.

Para este sistema, com controles adicionais congelados, aplicou-se a ferramenta de SimCron. A lista de contingências utilizadas é o critério $N - 1$ deste sistema. O resultado obtido para a análise de segurança estática se encontra na fig. 5.21.

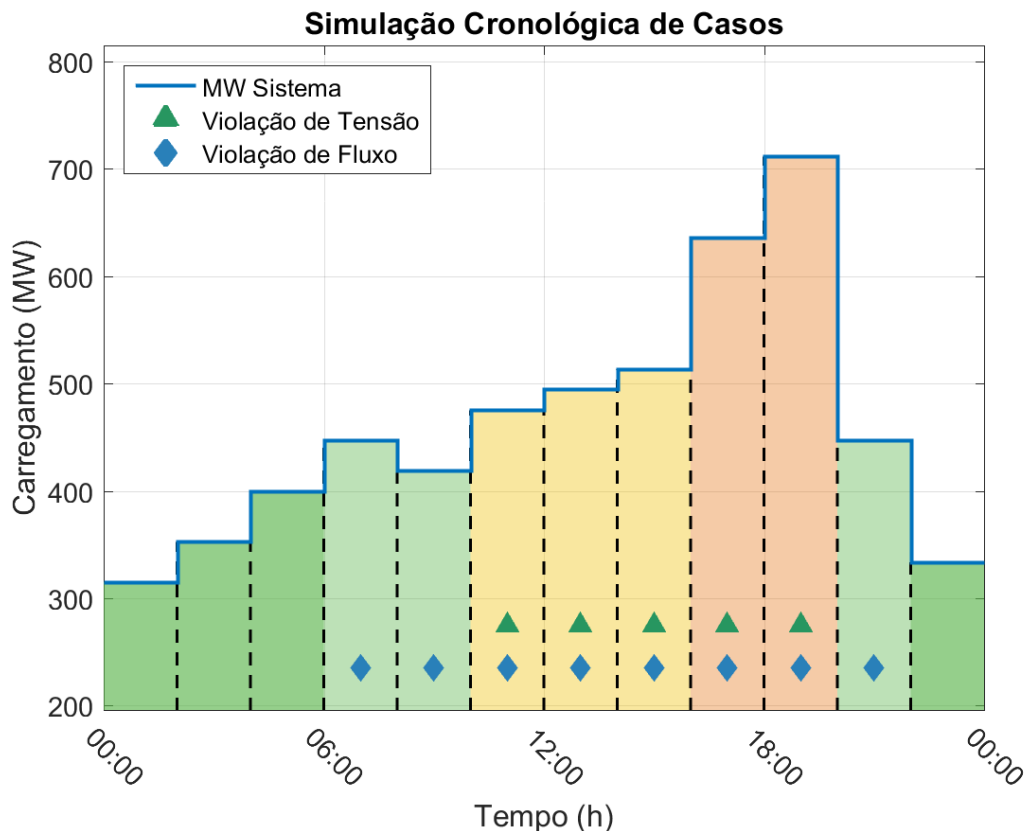


Figura 5.21: SimCron para o caso “9 Barras” com informação de segurança estática

Conforme o esperado, a partir de determinado valor de carregamento ($\sum P_l \gtrsim 420$ MW), passou a se observar violações de tensão e carregamento. No gráfico mostrado pela ferramenta, o grau de segurança é dado pela intensidade do verde (o verde

mais claro indica que há violação de carregamento ou violação de tensão); no caso de violação de ambos carregamento e tensão, adota-se um fundo amarelo. O fundo laranja indica que, naquele caso, alguma contingência não convergiu: sugerindo uma possível situação de colapso de tensão. Uma região laranja com marcadores de violação indica que, para as contingências que convergiram (ou caso base), foi detectado uma violação daquela natureza.

Neste estágio de implementação, o resultado da ferramenta SimCron difere-se da ferramenta VSA/DSA no que diz respeito à violação de geração de potência reativa. Futuramente, um marcador referente a este tipo de violação será incorporado ao resultado da ferramenta.

O resultado obtido para a análise de segurança dinâmica se encontra na fig. 5.22.

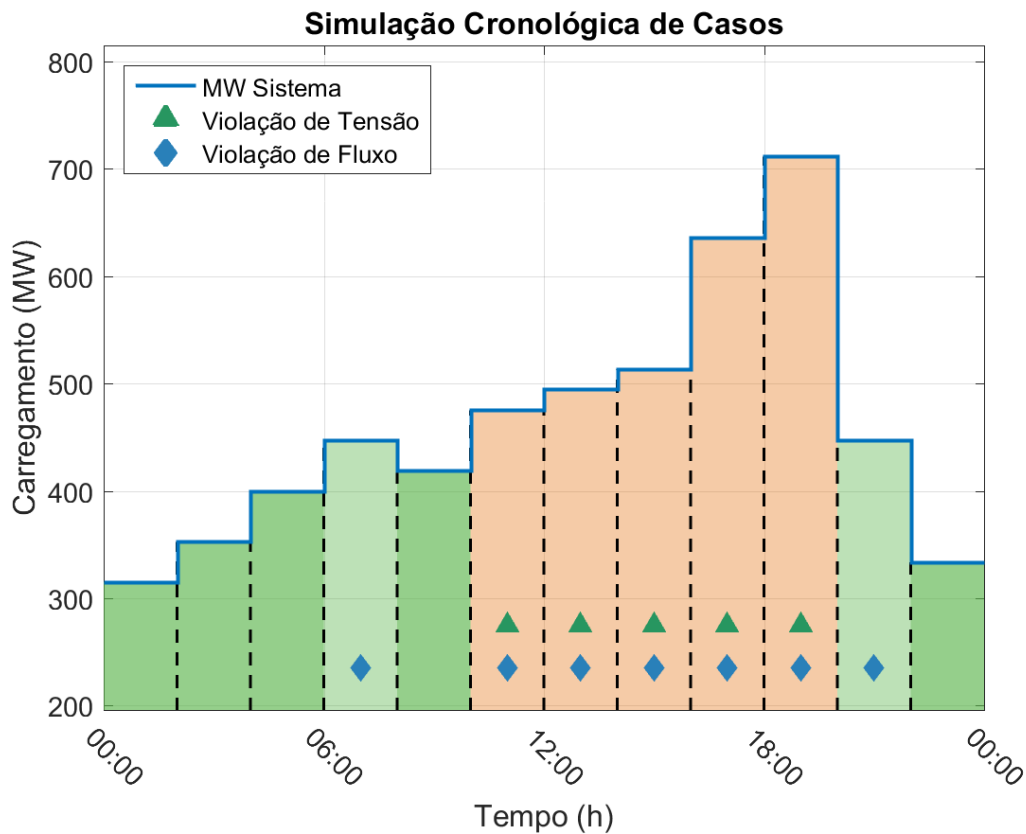


Figura 5.22: SimCron para o caso “9 Barras” com informação de segurança dinâmica

A diferença entre as análises estáticas e dinâmicas, naturalmente, se dará apenas na avaliação da segurança frente critérios de segurança estáticos e dinâmicos. Nesta ferramenta os patamares definidos para ambos os resultados não poderão diferir, pois correspondem a um mesmo ponto de operação do sistema estudado.

Da mesma maneira que a informação de violação de geração de reativo não foi implementada por hora para a segurança estática da ferramenta, não se implementou um marcador referente ao amortecimento estimado apresentado no capítulo 3.

Contudo, neste caso, optou-se por não incorporar a informação de amortecimento à ferramenta por fugir da premissa de espelhar o funcionamento da ferramenta VSA/DSA. Se for o caso dos nomogramas de segurança da ferramenta VSA/DSA incorporar um limite referente a algum amortecimento estimado mínimo, tal adição deverá ser replicada nesta ferramenta.

5.4.2 Exemplo Sistema Interligado Nacional

Para este exemplo, obteve-se a partir da plataforma SAGE uma série de casos cuja janela de observação é de alguns dias, amostrados em intervalos de mais ou menos cinco minutos. Como a quantidade de casos é excessiva, optou-se por reduzir a análise a alguns casos que representariam a operação do sistema de um dia, com amostragem de um caso por hora.

Dentre os casos selecionados, o primeiro patamar se refere ao estado do sistema às 05:59 do dia 27 de abril de 2016 e o último patamar se refere às 05:00 do dia 28 de abril de 2016.

De maneira a exemplificar que as mudanças entre esses patamares não estão apenas relacionadas a carga e geração, mas também à configuração topológica da rede, construiu-se um gráfico (fig. 5.23) da quantidade de circuitos ligados (excluindo-se os transformadores).

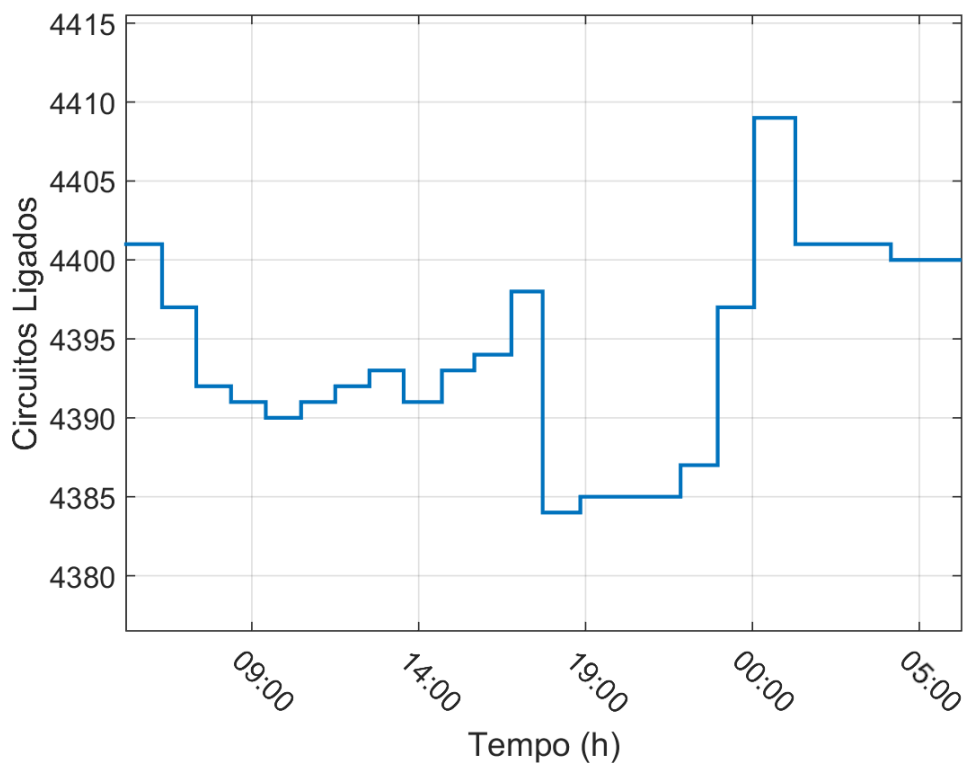


Figura 5.23: Variação da quantidade de circuitos ligados para o caso do SIN

Para este sistema, de maneira a exemplificar a ferramenta dentro de uma situação verossímil[23], aplicou-se a lista de contingências da tabela 5.2 e se monitorou as tensões dos barramentos do nível de tensão de 500kV e o fluxo dos circuitos que conectam esses barramentos.

Tabela 5.2: Lista de contingências a serem aplicadas no caso do SIN

#	Descrição	#	Descrição
1	Ivaipora - Itabera 765kV	7	São João do Piauí - Sobradinho 500kV
2	P.Dutra - Teresina2 500kV	8	Sapeaçu - Camaçari 500kV
3	Ibiuna - Bateias 500kV	9	Peixe - Serra da Mesa 500kV
4	Tucuruí - Marabá 500kV	10	Colinas - Ribeiro Gonçalves - 500kV
5	Bom Jesus da Lapa - Rio das Águas 500kV	11	Bateias - Curitiba 525kV
6	Rio das Águas - Serra da Mesa 500kV		

Os resultados para a etapa VSA do SimCron se encontram na fig. 5.24 de maneira gráfica e na fig. 5.25 na forma de texto.

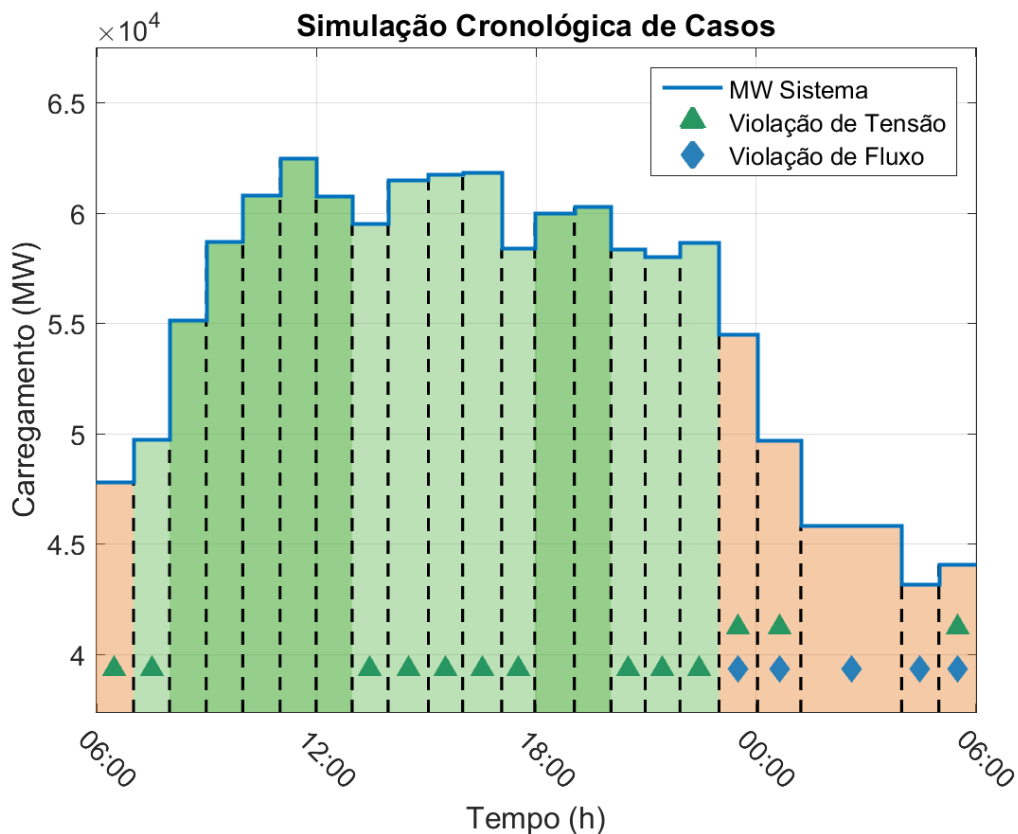


Figura 5.24: SimCron para o caso SIN com informação de segurança estática

SIMCRON_VSA				
(volt)	(flux)	(mvar)	(lseg)	(mw) (identificacao da configuracao pior)
5	0	0	5	1 Bom Jesus da Lapa - Rio das Éguas 500kV
6	0	0	6	0 Caso Base
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
1	0	0	1	0 Rio das Éguas - Serra da Mesa 500kV
2	0	0	2	0 Bom Jesus da Lapa - Rio das Éguas 500kV
1	0	0	1	0 Bom Jesus da Lapa - Rio das Éguas 500kV
1	0	0	1	0 Bom Jesus da Lapa - Rio das Éguas 500kV
6	0	0	6	0 Bom Jesus da Lapa - Rio das Éguas 500kV
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
6	0	0	6	0 Caso Base
6	0	0	6	0 Caso Base
6	0	0	6	0 Rio das Éguas - Serra da Mesa 500kV
1	64	0	64	4 Ivaipora - Itabera 765 kV
1	44	0	44	4 Bom Jesus da Lapa - Rio das Éguas 500kV
0	61	0	61	2 Bom Jesus da Lapa - Rio das Éguas 500kV
0	39	0	39	2 Bom Jesus da Lapa - Rio das Éguas 500kV
1	73	0	73	2 Bom Jesus da Lapa - Rio das Éguas 500kV

Figura 5.25: SimCron para o caso SIN com informação de segurança estática (.plt)

Pode-se observar que o sistema, para alguns momentos do dia, estaria operando sem respeitar algum critério de segurança de tensão (entre 20:00 e 22:00, aproximadamente). Em outros momentos, determinadas contingências, caso acontecessem, levariam a essa situação.

Deve ser levado em consideração que a ocorrência ou não de uma violação é decorrente da faixa de valores para a qual a violação se define. Assim, tais resultados são diretamente dependentes dos valores dos grupos limites de tensão do caso. Para alguns barramentos, por exemplo, há o limite de 0 p.u. como limite superior. Contudo, nos barramentos monitorados os valores limites de tensão são compatíveis com o esperado (1.15 p.u., e.g.).

Considerando o conjunto de contingências aplicadas, algumas contingências se mostraram severas ao ponto da não-solução do sistema estático. “Bom Jesus da Lapa - Rio das Éguas 500kV”, por exemplo, foi uma contingência que em vários instantes do dia quando não provocava violações de tensão, implicava em problema de convergência. O auge deste problema aconteceu dentro do intervalo das 23:00 às 01:00, onde quatro das onze contingências propostas não puderam ser verificadas.

Encontrou-se também os resultados do sistema para a análise de segurança dinâmica. Os resultados se encontram na fig. 5.24. Caso fosse desejado, poder-se-ia ter gerado também resultados de amortecimento mínimo para cada um dos patamares.

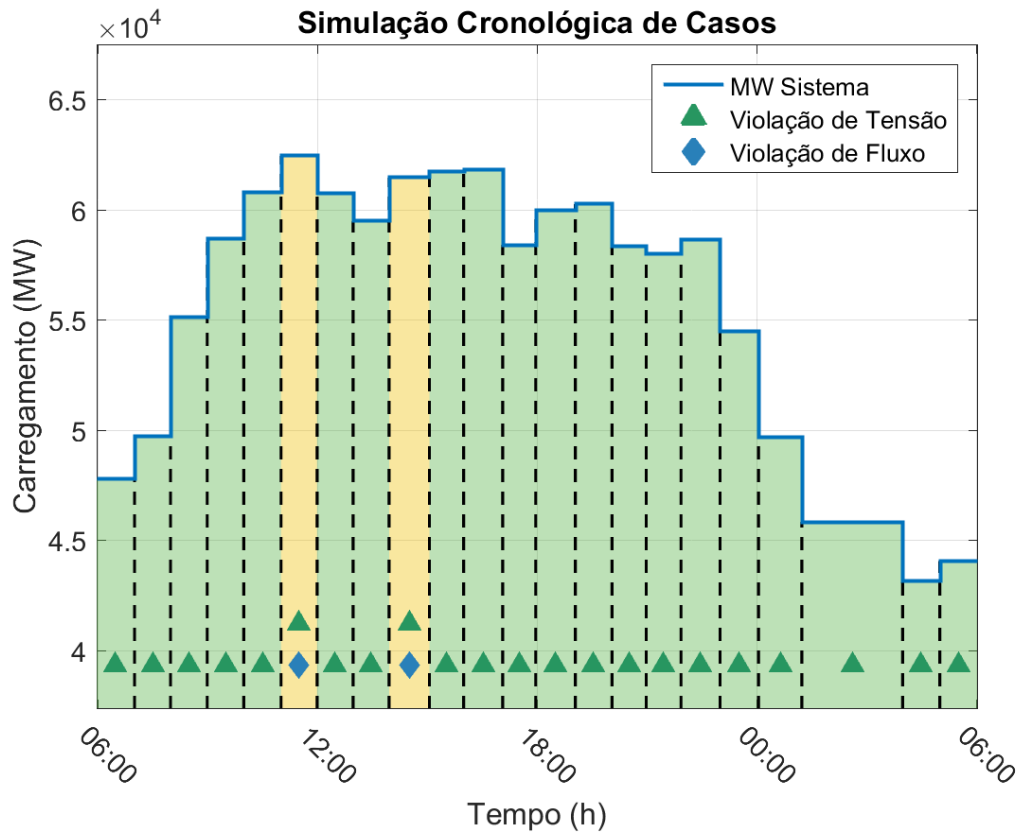


Figura 5.26: SimCron para o caso SIN com informação de segurança dinâmica

Para a simulação dinâmica, não houve contingências com problemas de convergência (ou que apresentasse instabilidade angular), ao contrário da análise estática. Contudo, observou-se que em todos os pontos, há um problema de violação de tensão. Para cada patamar e cada contingência, é gerado um arquivo de saída contendo as informações de violações dinâmicas. Para o primeiro patamar, em particular, obteve-se a seguinte mensagem para a simulação da contingência “Ivaipora - Itabera 765kV”):

```
VIOLOU TENSAO ENTRE PICOS (<2%), BARRA= 4517 VMOD= 0.105735E+01 TIME= 0.122900E+02
```

Figura 5.27: Violação dinâmica para o primeiro patamar do caso SimCron do SIN

O motivo da ocorrência de uma violação de tensão no caso dinâmico que não no caso estático está na natureza da violação ocorrida. O tipo de violação que ocorreu na fig. 5.27 é específico da análise dinâmica e diz respeito ao amortecimento observado no sinal de tensão. A resposta no tempo da tensão da barra 4517 (e os guias para a verificação desta violação) encontra-se na fig. 5.28. O resultado em texto do SimCron para análise dinâmica se encontra na fig. 5.29.

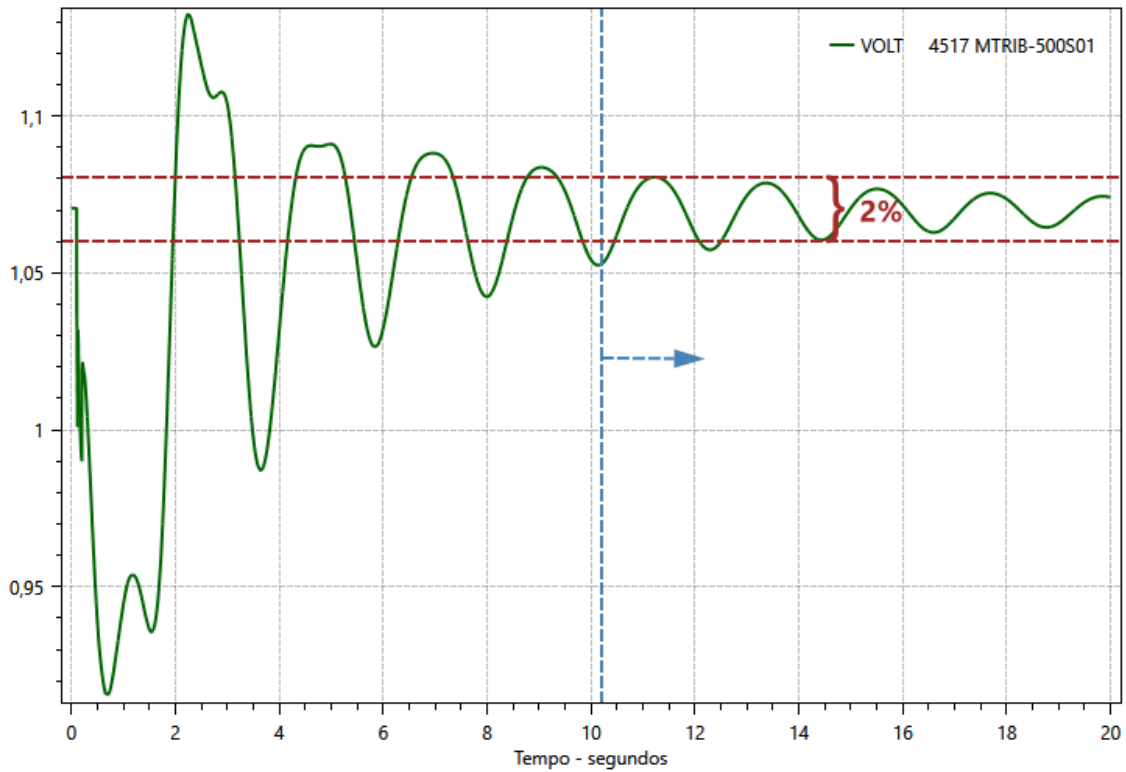


Figura 5.28: Sinal de tensão da barra 4517 para o primeiro patamar do caso SimCron do SIN

SIMCRON_DSA					
(volt)	(flux)	(mvar)	(lseg)	(mw)	(identificacao da configuracao pior)
1	0	0	1	0	Ivaipora - Itabera 765kV
3	0	0	3	0	Caso Base
1	0	0	1	0	Ivaipora - Itabera 765kV
1	0	0	1	0	Ivaipora - Itabera 765kV
1	0	0	1	0	Ivaipora - Itabera 765kV
1	1	1	2	0	Ivaipora - Itabera 765kV
1	0	0	1	0	Ivaipora - Itabera 765kV
1	0	0	1	0	Ivaipora - Itabera 765kV
1	1	0	2	0	Ivaipora - Itabera 765kV
1	0	0	1	0	Ivaipora - Itabera 765kV
1	0	0	1	0	Ivaipora - Itabera 765kV
1	0	0	1	0	Ivaipora - Itabera 765kV
1	0	0	1	0	Ivaipora - Itabera 765kV
1	0	0	1	0	Ivaipora - Itabera 765kV
1	0	0	1	0	Ivaipora - Itabera 765kV
4	0	0	4	0	Caso Base
2	0	0	2	0	Caso Base
1	0	0	1	0	Ivaipora - Itabera 765kV
1	0	0	1	0	Ivaipora - Itabera 765kV
1	0	0	1	0	Ivaipora - Itabera 765kV
1	0	0	1	0	Ivaipora - Itabera 765kV
1	0	0	1	0	Ivaipora - Itabera 765kV
1	0	0	1	0	Ivaipora - Itabera 765kV

Figura 5.29: SimCron para o caso SIN com informação de segurança dinâmica (.plt)

5.5 Conclusões Parciais

A ferramenta de Simulação Cronológica de Casos apresenta uma nova maneira de visualizar sistemas, acrescentando-se a informação temporal à análise de segurança realizada pelos Anarede e Anatem. Ao contrário da visualização em nomogramas, o SimCron apresenta os resultados de maneira intuitiva, com marcadores específicos para cada patamar acerca da natureza do que foi violado. Naturalmente, o poder de resolução do gráfico gerado é limitado, não sendo recomendado para um número muito grande de patamares.

O uso da ferramenta de Simulação Cronológica de Casos se mostrou bastante simplificado. Para o usuário, pouco difere da ferramenta VSA/DSA que já havia sido disponibilizada. O compartilhamento da estrutura, a nível de algoritmo, com a ferramenta VSA/DSA também permitiu que, dentre outras coisas, a análise dinâmica pudesse ser realizada de maneira paralelizada, aumentando a sua eficiência computacional.

A simulação de casos oriundos da plataforma SAGE *out-of-the-box* só foi possível devido a diversas implementações que mudaram a filosofia de uso do Anatem. A partir de tais implementações, garantiu-se que as simulações dinâmicas que venham a ser efetuadas sejam bem sucedidas com o mínimo possível de interferência do usuário.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho, foram propostas e apresentadas algumas ferramentas que dão ao analista maior domínio sobre a segurança estática e dinâmica do sistema de potência em estudo. Tais ferramentas se baseiam na ferramenta de Região de Segurança via Método dos Nomogramas, já disponível no programa computacional Anarede (responsável pela determinação do mapeamento e verificação da segurança estática) e pelo programa Anatem (responsável pela verificação da segurança dinâmica).

A primeira ferramenta apresentada refere-se a uma funcionalidade nova para o programa computacional Anatem. A partir dela, será possível de se estimar o amortecimento linear do sistema (sujeito a um evento) com a finalidade de se gerar nomogramas de amortecimento, de maneira semelhante a uma ferramenta em desenvolvimento do PacDyn; mas com a vantagem de se aproveitar as estruturas de paralelização existentes na ferramenta VSA/DSA. Esta ferramenta, na forma como foi implementada, permite que qualquer análise de segurança que use o Anatem também consiga extrair informação de amortecimento do caso.

A segunda ferramenta apresentada traz uma nova forma de visualização para o Fluxo de Potência Continuado. Anteriormente, era permitido ao usuário aplicar contingências e considerar violações de fluxo e tensão como critério de parada. O recurso, contudo, permite que sejam facilmente visualizadas tais informações de violação, em conjunto com o traçado das curvas relativo ao Fluxo de Potência Continuado. Há um ganho na síntese de informações pelo uso de marcação visual através de regiões coloridas que seguem o padrão de semáforo do VSA/DSA. Para o analista, torna-se claro a identificação da margem de crescimento de carga em que o sistema está sujeito até que seja percebido problemas em alguma grandeza monitorada.

A terceira ferramenta apresenta um novo tipo de análise para o Anarede, baseando-se nos conceitos de curva de carga e Simulação Monte Carlo Sequencial. Com este novo recurso, é permitido ao analista fazer simulações sequenciais de casos de um mesmo arquivo histórico, sob a observância da segurança estática e dinâmica. Através do arquivo de resultados, que se apresenta simultaneamente na forma de

tabela e gráfico, o analista pode facilmente observar os períodos de tempo em que o sistema se apresenta como passível de problemas na ocorrência de eventos previstos.

Apresentou-se, neste trabalho, um caso exemplo de 9 Barras utilizado como demonstrativo da ferramenta de Região de Segurança Estática e Dinâmica e casos do Sistema Interligado Nacional, oriundos de diversas fontes. Para todos os casos, mostrou-se a facilidade que o analista tem em acessar tais recursos disponibilizados, requerendo não mais que a preparação usual de um caso de estabilidade, considerando também as monitorações e contingências.

Como trabalho futuro, sugere-se a investigação de uma melhor combinação de parâmetros relativos ao método ERA, com o objetivo de aumentar a confiabilidade dos resultados obtidos.

Sugere-se também a investigação de novos conceitos de segurança relativos à confiabilidade do sistema, relacionando-se com a ferramenta de Simulação Cronológica de Casos. Havendo um amostrador de estados do sistema, pode-se submeter esta ferramenta sob Simulação Monte Carlo a fim de se obter parâmetros de confiabilidade que levem em consideração os conceitos de segurança aplicados nas ferramentas de Região de Segurança do Anarede e Anatem.

Por fim, sugere-se estudos que visem a aplicação das ferramentas descritas neste trabalho. A partir desses estudos, seria possível a revisão de heurísticas e mecanismos adotados nas ferramentas desenvolvidas. É preciso, pois, a verificação da usabilidade em diversos cenários de uso para que seja possível aferir a extensão das vantagens conferidas pelos novos recursos apresentados.

Referências Bibliográficas

- [1] ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. “Casos de Referência - Estabilidade - Transitórios Eletromecânicos”. Fevereiro, 2016. Disponível em: <http://www.ons.org.br/avaliacao_condicao/casos_eletromecanicos.aspx>.
- [2] ALVES, F. R. M., HENRIQUES, R. M., PASSOS FILHO, J. A., et al. “Ferramenta Integrada para Avaliação da Segurança Estática e Dinâmica de Sistemas Elétricos de Potência de Grande Porte”. In: *Anais do XII SEPOPE*, 2012.
- [3] PARREIRAS, T. J. M. A., GOMES JÚNIOR, S., TARANTO, G. N., et al. “Avaliação de Segurança a Pequenos Sinais de Sistemas de Potência com o PacDyn”. In: *XXIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE*, 2015.
- [4] KUNDUR, P., PASERBA, J., AJJARAPU, V., et al. “Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions”, *IEEE transactions on Power Systems*, v. 19, n. 3, pp. 1387–1401, 2004.
- [5] MORISON, K., WANG, L., KUNDUR, P. “Power System Security Assessment”, *IEEE Power and Energy Magazine*, v. 2, n. 5, pp. 30–39, 2004.
- [6] LYAPUNOV, A. M. “The General Problem of the Stability of Motion”, *International Journal of Control*, v. 55, n. 3, pp. 531–534, 1992. doi: 10.1080/00207179208934253. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/00207179208934253>>.
- [7] KHALIL, H. K. *Nonlinear Systems*. Prentice Hall, 2001.
- [8] VOROTNIKOV, V. I. *Partial Stability and Control*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [9] BAZOVSKY, I. *Reliability Theory and Practice*. Courier Corporation, 2004.

- [10] PESCHON, J., PIERCY, D. S., TINNEY, W. F., et al. “Sensitivity in Power Systems”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-87, n. 8, pp. 1687–1696, Aug 1968. ISSN: 0018-9510. doi: 10.1109/TPAS.1968.292130.
- [11] ALSAC, O., STOTT, B., TINNEY, W. F. “Sparsity-Oriented Compensation Methods for Modified Network Solutions”, *IEEE Power Engineering Review*, v. PER-3, n. 5, pp. 24–25, May 1983. ISSN: 0272-1724. doi: 10.1109/MPER.1983.5519138.
- [12] MONTICELLI, A., PEREIRA, M. V. F., GRANVILLE, S. “Security-Constrained Optimal Power Flow with Post-Contingency Corrective Rescheduling”, *IEEE Power Engineering Review*, v. PER-7, n. 2, pp. 43–44, Feb 1987. ISSN: 0272-1724. doi: 10.1109/MPER.1987.5527553.
- [13] AJJARAPU, V., CHRISTY, C. “The Continuation Power Flow: a Tool for Steady State Voltage Stability Analysis”, *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 7, n. 1, pp. 416–423, 1992.
- [14] ALMEIDA, F. D. C. B. *Avaliação do Desempenho dos Dispositivos de Controle e Modelagem de Carga a Partir de Regiões de Segurança Estática*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2011.
- [15] PARETO, R. P. *Construção da Região de Segurança Estática de Sistemas Elétricos de Potência Utilizando Direções de Transferência de Geração Ramificadas*. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, 2016.
- [16] BILLINTON, R., ALLAN, R. N. *Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques*. Springer, 1992.
- [17] BILLINTON, R., ALLAN, R. N. *Reliability Evaluation of Power Systems*. Springer, 1996.
- [18] ALVES, F. R. M., HENRIQUES, R. M., PASSOS FILHO, J. A., et al. “Static and Dynamic Security Assessment of Large Power Systems for Online and Offline Applications”. In: *45th CIGRÉ Session*, 2014.
- [19] FALCÃO, D. M., BORGES, C. L. T., TARANTO, G. N. “High Performance Computing in Power and Energy Systems”. cap. High Performance Computing in Electrical Energy Systems Applications, Springer, 2013.
- [20] FRANCIS, J. G. “The QR Transformation – a Unitary Analogue to the LR Transformation – Part 1”, *The Computer Journal*, v. 4, n. 3, pp. 265–271, 1961.

- [21] FRANCIS, J. G. “The QR Transformation – Part 2”, *The Computer Journal*, v. 4, n. 4, pp. 332–345, 1962.
- [22] MARTINS, N. “The Dominant Pole Spectrum Eigensolver for Power System Stability Analysis”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 12, n. 1, pp. 245–254, 1997.
- [23] ALVES, F. R. M., HENRIQUES, R. M., ALMEIDA, L. P., et al. “Using Static and Dynamic Security Assessment Tool to Evaluate the Effects of Increasing Wind Power Penetration in Future Operating Conditions of the Brazilian Interconnected Power System”. In: *46th CIGRÉ Session*, 2016.
- [24] JUANG, J.-N., PAPPA, R. S. “An Eigensystem Realization Algorithm for Modal Parameter Identification and Model Reduction”, *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, v. 8, n. 5, pp. 620–627, 1985.
- [25] SANCHEZ-GASCA, J. J., CHOW, J. H. “Performance Comparison of Three Identification Methods for the Analysis of Electromechanical Oscillations”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 14, n. 3, pp. 995–1002, 1999.
- [26] HOWELL, F., KUNDUR, P., CHUNG, C. “A Tool for Small-Signal Security Assessment of Power Systems”. In: *pica 2001. Innovative Computing for Power-Electric Energy Meets the Market. 22nd IEEE Power Engineering Society. International Conference on Power Industry Computer Applications (Cat. No. 01CH37195)*, pp. 246–252, 2001.
- [27] RALSTON, A., RABINOWITZ, P. *A First Course in Numerical Analysis*. Dover Publications, Inc., 2001.
- [28] WEISSTEIN, E. W. “Least Squares Fitting–Exponential”. MathWorld - A Wolfram Web Resource. Disponível em: <http://mathworld.wolfram.com/LeastSquaresFittingExponential.html>.
- [29] DE PRONY, G. R. “Essai Expérimental et Analytique - Sur les lois de la Dilatabilité des fluides élastiques et sur celles de la Force expansive de la vapeur de l’eau et de la vapeur de l’alkool, à différentes températures”, *J. de l’Ecole Polytechnique*, 1795.
- [30] HAUER, J. F., DEMEURE, C., SCHARF, L. “Initial results in Prony Analysis of Power System Response Signals”, *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 5, n. 1, pp. 80–89, 1990.
- [31] SCHARF, L. L. *Statistical Signal Processing*. Prentice Hall, 1991.

- [32] LAY, D. C., LAY, S. R., MCDONALD, J. J. *Linear Algebra and its Applications*. Pearson Education, Inc., 2016.
- [33] BROCKETT, R. *Finite Dimensional Linear Systems*. Wiley, 1970.
- [34] PAPPA, R. S., JUANG, J.-N. “Some Experiences with the Eigensystem Realization Algorithm”. In: *Proceedings of the 6th International Modal Analysis Conference*, 1988.
- [35] KALMAN, R., HO, B. “Effective Construction of Linear State Variable Models from Input Output Data”. In: *Proc. 3rd Allerton Conference on Circuit and System Theory*, pp. 449–459, 1965.
- [36] PAPPA, R. S., JUANG, J.-N. “Galileo Spacecraft Modal Identification Using an Eigensystem Realization Algorithm”, *The Journal of the Astronautical Sciences*, 1984.
- [37] PETERSON, L. D. “Efficient Computation of the Eigensystem Realization Algorithm”, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, v. 18, n. 3, pp. 395–403, 1995.
- [38] JUANG, J.-N., PAPPA, R. S. “Effects of Noise on Modal Parameter Identified by the Eigensystem Realization Algorithm”, *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 1986.
- [39] BAZÁN, F. S. V. “Eigensystem Realization Algorithm (ERA): Reformulation and System Pole Perturbation Analysis”, *Journal of Sound and Vibration* 274, 2004.
- [40] PAPPA, R. S., ELLIOTT, K. B., SCHENK, A. “Consistent-Mode Indicator for the Eigensystem Realization Algorithm”, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, v. 16, n. 5, pp. 852–858, 1993.
- [41] KLEMA, V., LAUB, A. “The Singular Value Decomposition: Its Computation and some Applications”, *IEEE Transactions on automatic control*, v. 25, n. 2, pp. 164–176, 1980.
- [42] MEDINA, E. A. *Multi-input, Multi-output System Identification from Frequency Response Samples with Applications to the Model of Large Space Structures*. Tese de Mestrado, Ohio University, 1991.
- [43] SINGH, S., HAMANN, J. “Prony Toolbox”. MATLAB Mathworks - File Exchange, 2012. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/3955-prony-toolbox>>.

- [44] ANDERSON, P. M., FOUAD, A. A. *Power System Control and Stability*. John Wiley & Sons, 2013.
- [45] GOMES JR., S., PARREIRAS, T. J. M. A., DO AMARAL, T. S., et al. *PacDyn User's Manual*. Cepel - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Version 9.7.2.
- [46] METCALF, M., REID, J., COHEN, M. *Modern Fortran Explained*. Oxford University Press, 2011.
- [47] ANDERSON, E., BAI, Z., BISCHOF, C., et al. *LAPACK Users' Guide*. Third ed. Philadelphia, PA, Society for Industrial and Applied Mathematics, 1999. ISBN: 0-89871-447-8 (paperback).
- [48] GUHLE, B. D., DA COSTA, M. R., BORGES, C. L. T., et al. "Integração de uma Ferramenta VSA/DSA ao EMS SAGE". In: *XXIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE*, 2015.
- [49] DOBSON, I., VAN CUTSEM, T., VOURNAS, C., et al. "Voltage Stability Assessment: Concepts, Practices and Rools". v. 11, cap. Basic Theoretical Concepts, pp. 2-1-2-99, IEEE/PES Power System Stability Subcommittee Special Publication, 2002.
- [50] MUNIZ, V. S. *Fluxo de Potência Continuado Aplicado na Análise de Continuidade*. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal Fluminense, Julho 2015.
- [51] MONTICELLI, A. J. *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*. E. Blucher, 1983.
- [52] PARREIRAS, T. J. M. A. *Metodologia e Implementação Computacional para Análise da Estabilidade a Pequenos Sinais em Múltiplos Cenários*. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, 2012.
- [53] HELLER, E. *A Psicologia das Cores: como as Cores Afetam a Emoção e a Razão*. GG, 2012.
- [54] FERRAZ, J. *Fluxo de Potência Continuado e Análise Modal da Estabilidade de Tensão de Sistemas de Grande Porte*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1998.
- [55] FRAKES, W., LEA, D. "Design for Reuse and Object Oriented reuse Methods". In: *Sixth Annual Workshop on Institutionalizing Software Reuse (WISR'93)*, Owego, NY, 1993.

- [56] ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. “PAR - Plano de Ampliação e Reforços”. 2017. Disponível em: <http://www.ons.org.br/plano_ampliacao/plano_ampliacao.aspx>.
- [57] ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. “Casos de Referência - Estabilidade - Transitórios Eletromecânicos”. Outubro, 2015. Disponível em: <http://www.ons.org.br/avaliacao_condicao/casos_eletromecanicos.aspx>.
- [58] BORGES, C. L. T., FALCÃO, D. M., MELLO, J. C. O., et al. “Composite Reliability Evaluation by Sequential Monte Carlo Simulation on Parallel and Distributed Processing Environments”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 16, n. 2, pp. 203–209, 2001.
- [59] OF MICHIGAN. ENGINEERING SUMMER CONFERENCES, U. *Modern Methods for Solving Engineering Problems: Numerical Methods, Optimization Techniques and Simulation*. 1968. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=EHTBuMBUr2MC>>.
- [60] DA SILVA, L. R., LÍRIO, F. L., NETTO, N. A. R. L., et al. “Simulação Dinâmica de Casos Oriundos do Tempo Real no Programa Anatem”. In: *XIV Encontro para Debates de Assuntos de Operação - EDAO*, 2016.
- [61] LIRIO, F. L., NETTO, N. A. R. L., DA SILVA, L. R. *Manual do Usuário do Programa Anatem*. Cepel - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Agosto 2016. Versão 11.00.01.
- [62] GOMES JÚNIOR, S., LIRIO, F. L., NETTO, A. C., et al. “Melhorias na Identificação e Solução de Problemas de Convergência no Anatem”. In: *XXIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE*, 2015.
- [63] DINIZ, P. S., DA SILVA, E. A., NETTO, S. L. *Digital Signal Processing: System Analysis and Design*. Cambridge University Press, 2010.

Apêndice A

Comparação dos Métodos de Estimação de Amortecimento para Algumas Classes de Sinais

A.1 Sinal Simples

Seja o sinal $y(t)$, uma exponencial amortecida acrescida de uma constante, definido como:

$$y(t) = 2.5e^{-x/1.5} \cos(3x) + 2 \quad (\text{A.1})$$

Cujo modo de oscilação é, naturalmente, $\lambda_i = -0.6667 \pm j3.0000$. A representação gráfica deste sinal se encontra na figura A.1.

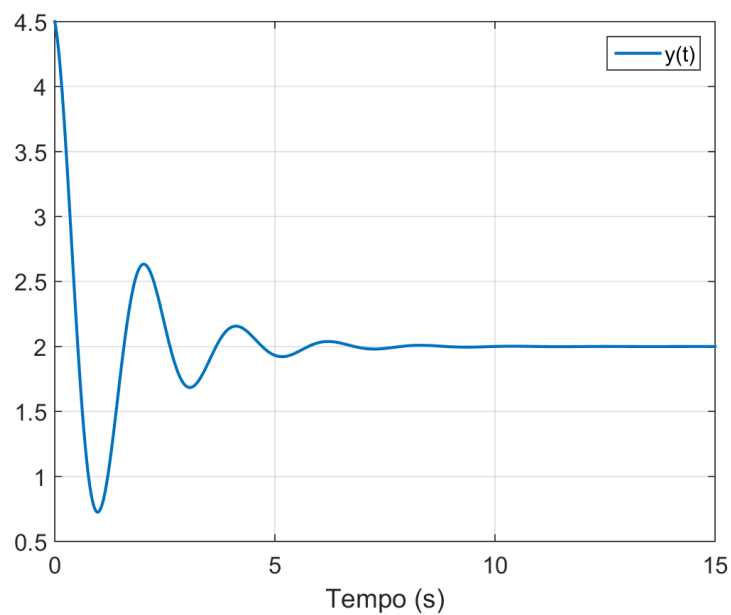


Figura A.1: Representação gráfica do sinal simples a ser testado

Para o Métodos dos Picos-Sucessivos, se analisou o sinal sob diferentes intervalos de amostragem. O objetivo desta comparação é observar a influência da taxa de amostragem $f_s = 1/T_s$ em relação a taxa de amostragem suficiente, de acordo com o teorema de Nyquist-Shannon[63]. Na tabela A.1, encontra-se os resultados do método para diferentes intervalos de amostragem:

Tabela A.1: Resultado do modo encontrado para o sinal simples pelo Método dos Picos-Sucessivos para diferentes intervalos de amostragem

T_s (ms)	λ	ξ
10	$-0.6671 \pm j2.9991$	0.2171
50	$-0.6654 \pm j2.9920$	0.2171
100	$-0.6640 \pm j2.9920$	0.2167
150	$-0.6641 \pm j2.9920$	0.2167
200	$-0.6573 \pm j2.9920$	0.2146
300	$-0.6629 \pm j2.9920$	0.2163
500	$-0.5762 \pm j3.0159$	0.1877
700	$-0.3304 \pm j2.9910$	0.1098

Como era de se esperar, o método começou a entregar resultados muito ruins conforme o parâmetro T_s foi aumentado, mas apenas a partir de determinado ponto. Conforme o teorema de Nyquist-Shannon, a distorção do sinal deverá acontecer quando a frequência de amostragem for inferior à frequência do sinal, isto é, $3Hz$. Em termos de intervalo de amostragem, a distorção se dá quando $T_s \gtrsim 333ms$. Na figura A.2, pode-se observar a influência de T_s na amostragem do sinal e na construção da exponencial envoltória.

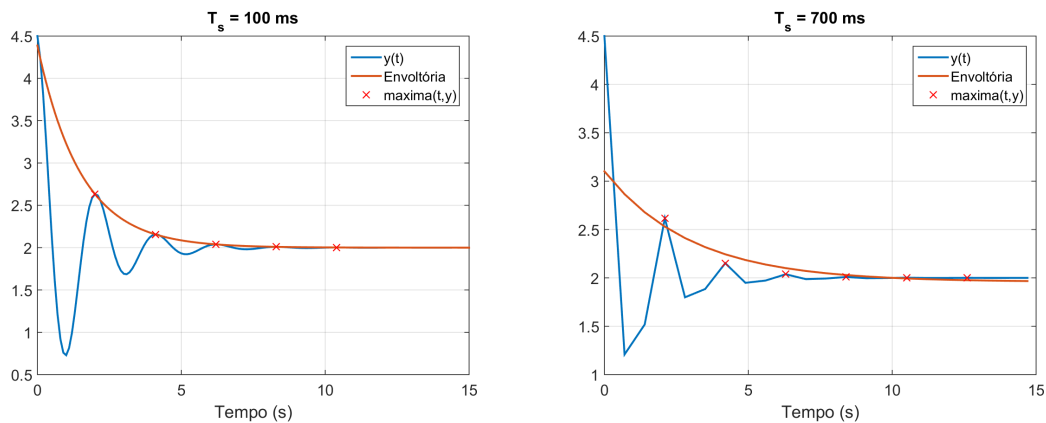


Figura A.2: Influência do intervalo de amostragem no Método dos Picos-Sucessivos

Para o Método de Prony, deseja-se testar dois parâmetros: a quantidade de pontos amostrados e a ordem p do sistema desejado. Em sua formulação mais básica, o Método de Prony não é capaz de encontrar uma realização de estado mínima, devendo portanto definir-se previamente a ordem desejada. Conhecendo-se o sistema a

ser modelado, ainda que desconhecendo os parâmetros que definem a sua dinâmica, a ordem p da realização desejada não é um problema a ser solucionado. Para o problema em questão, sabe-se que tem ao menos um par conjugado e provavelmente um polo no zero (para representar a constante 2). A tabela A.2 apresenta os resultados para um teste considerando uma ordem $p = 5$ e variando o intervalo de amostragem.

Tabela A.2: Resultado do Método de Prony para o sinal simples com $p = 5$ e diferentes intervalos de amostragem T_s

T_s (ms)	λ_i	ξ_i	T_s (ms)	λ_i	ξ_i
10			500		
	0.0023	-1.0000		-7.e-16	-
	-0.2242 + j 249.61	0.0009		2.6062 + j 6.2832	-0.3831
	-0.2242 - j 249.61	0.0009		-0.6667 + j 3.0000	0.2169
	-0.9699 + j 3.5354	0.2646		-0.6667 - j 3.0000	0.2169
	-0.9699 - j 3.5354	0.2646		-5.2537 + j 6.2832	0.6415
30			700		
	1.2e-7	-		3.e-16	-
	-0.0462 + j 104.72	0.0004		1.5745 + j 4.4480	-0.3310
	-22.868 - j 104.72	0.2133		-0.6667 + j 3.0000	0.2169
	-0.6667 + j 3.0000	0.2169		-0.6667 - j 3.0000	0.2169
	-0.6667 - j 3.0000	0.2169		-0.5322	1.0000
50			1000		
	-4.3003 + j 42.599	0.1004		1.e-14	-
	-0.6667 + j 3.0000	0.2169		1.4276 + j 2.0002	-0.5807
	-0.6667 - j 3.0000	0.2169		1.4276 - j 2.0002	-0.5807
	-11.659 - j 48.332	0.2345		-0.6666 + j 3.0000	0.2169
	-1.1e-9 + j 3.e-10	0.9498		-0.6666 - j 3.0000	0.2169
100			1200		
	2.e-10 - j 1.e-10	-		-5.e-16	-
	2.9595 + j 13.184	-0.2190		2.3507	-1.0000
	-0.6667 - j 3.0000	0.2169		-0.3069 + j 2.6180	0.1165
	-0.6667 + j 3.0000	0.2169		-0.6667 + j 2.2360	0.2857
	-7.3563 - j 26.510	0.2674		-0.6667 - j 2.2360	0.2857
300			1500		
	5.e-13	-		-7.e-17	-
	-0.8950 + j 10.472	0.0852		0.9501 + j 2.0944	-0.4131
	-0.6667 + j 3.0000	0.2169		0.3076 + j 2.0944	-0.1453
	-0.6667 - j 3.0000	0.2169		-0.6667 + j 1.1888	0.4891
	-0.3106	1.0000		-0.6667 - j 1.1888	0.4891

Para uma realização de ordem 5, os resultados obtidos mostraram que apenas para valores de T_s grandes (comparativamente com o período do sinal $T_s \approx 333ms$),

o método deixou de se comportar como esperado. Para valores T_s inferiores ou iguais a 1000ms, a existência do modo $\lambda = 0.6667 \pm j3.0000$ é verificada corretamente. Contudo, outros modos são gerados, modos que naturalmente surgem pela determinação da ordem do sistema ser 5.

O problema, então, consiste em identificar quais modos são representativos e quais modos são espúrios. Pode-se definir algum critério como só considerar modos com frequências típicas de modos eletromecânicos ou em outra decisão arbitrária como $|\text{Im}(\lambda)| < 100.0$, considerando que frequências superiores devem indicar modos provenientes do cálculo numérico.

Mesmo levando um critério desses em consideração, o teste para $T_s = 100ms$ apresentaria modos espúrios cuja frequência estaria dentro da banda esperada. Outro critério que pode ser adotado seria apenas considerar modos cujo conjugado também seja um modo; uma vez que um sistema físico com parâmetros reais apresenta apenas modos reais e complexos conjugados. Contudo, este critério também não garante que todos os modos matemáticos foram identificados, haja vista que para $T_s = 1000ms$, existe um par conjugado que poderia ser claramente um modo eletromecânico.

Para se avaliar a influência da ordem p da realização, escolheu-se o intervalo de amostragem $T_s = 100ms$, embora qualquer outro T_s que tivesse encontrado o modo com precisão pudesse ser utilizado. A tabela A.3 apresenta os resultados para essa nova análise.

Tabela A.3: Resultado do Método de Prony para o sinal simples com $T_s = 100ms$ e diferentes ordens p da realização

p	λ_i	ξ_i	p	λ_i	ξ_i
3			4		
	1.4e-9	-		1.e-10	-0.0012
	-0.6667 + j3.0000	0.2169		-0.6667 + j3.0000	0.2169
	-0.6667 - j3.0000	0.2169		-0.6667 - j3.0000	0.2169
				-7.6938 + j31.416	0.2378
5			6		
	2.e-10 - j1.e-10	-		2.e-12	-
	2.9595 + j13.184	-0.2190		12.597 + j16.591	-0.6047
	-0.6667 - j3.0000	0.2169		12.597 - j16.591	-0.6047
	-0.6667 + j3.0000	0.2169		-0.6678 + j31.416	0.0212
	-7.3563 - j26.510	0.2674		-0.6667 + j3.0000	0.2169
				-0.6667 - j3.0000	0.2169

Continua na próxima página

p	λ_i	ξ_i	p	λ_i	ξ_i
7			8		
	2.e-12	-		6.e-12	-
	0.0124 + j 28.794	-0.0004		34.695	-1.0000
	0.0124 - j 28.794	-0.0004		19.431 + j 31.416	-0.5260
	-0.6667 + j 3.0000	0.2169		-0.1743 + j 31.416	0.0055
	-0.6667 - j 3.0000	0.2169		-0.2497 + j 19.450	0.0128
	-3.1425 + j 11.658	0.2602		-0.2497 - j 19.450	0.0128
	-3.1425 - j 11.658	0.2602		-0.6667 + j 3.0000	0.2169
				-0.6667 - j 3.0000	0.2169

A avaliação do parâmetro p não foi conclusiva acerca de situações problemáticas, a menos da particularidade já observada sobre a quantidade de modos matemáticos ser a diferença do parâmetro p e a quantidade de modos da realização de fato.

Para o Método ERA, assim como no Método dos Picos-Sucessivos, deseja-se avaliar apenas o efeito da amostragem sobre a realização obtida. Como o método em sua formulação mais básica já encontra uma realização de estado mínimo e também apresenta um parâmetro de qualidade acerca dos modos encontrados, a análise dos modos encontrados é facilitada. A tabela A.4 contém o resultado para diferentes amostragens do sinal.

Tabela A.4: Resultado do Método ERA para o sinal simples com diferentes intervalos de amostragem T_s

T_s (ms)	λ_i	γ_i	ξ_i	T_s (ms)	λ_i	γ_i	ξ_i
10				500			
	4.e-14	1.0000	-		1.e-15	1.0000	-
	-0.6667 ± j 3.0000	1.0000	0.2169		-0.6667 ± j 3.0000	1.0000	0.2169
30				700			
	-3.e-15	1.0000	-		0.0000	1.0000	-
	-0.6667 ± j 3.0000	1.0000	0.2169		-0.6667 ± j 3.0000	1.0000	0.2169
50				1000			
	-2.e-15	1.0000	-		0.0000	1.0000	-
	-0.6667 ± j 3.0000	1.0000	0.2169		-0.6667 ± j 3.0000	1.0000	0.2169
100				1200			
	9.e-15	1.0000	-		2.e-16	1.0000	-
	-0.6667 ± j 3.0000	1.0000	0.2169		-0.6667 ± j 2.2360	1.0000	0.2857
300				1500			
	1.e-15	1.0000	-		3.e-16	1.0000	-
	-0.6667 ± j 3.0000	1.0000	0.2169		-0.6667 ± j 1.1888	1.0000	0.4891

Os resultados obtidos mostraram que, para esse sinal simples, o método se comportou de maneira bastante robusta, identificando corretamente o modo de oscilação desejado (e apenas o modo desejado, além do polo no zero previsto) mesmo quando o sinal foi amostrado de maneira a produzir *aliasing* ($T_s \gtrsim 333ms$). Esta robustez é uma propriedade muito desejada, uma vez que o objetivo é encontrar um método que seja executado com nenhuma interferência do usuário.

Comparando-se os três métodos tem-se os seguintes modos encontrados:

Tabela A.5: Comparação entre os métodos para o sinal simples e $T_s = 100ms$

Picos-Sucessivos		Prony ($p = 5$)		ERA		
λ_i	ξ_i	λ_i	ξ_i	λ_i	γ_i	ξ_i
$-0.6440 \pm j2.9920$	0.2167	$1.2e-7$	-	$9.e-15$	1.0000	-
		$-0.0462 + j104.72$	0.0004	$-0.6667 \pm j3.0000$	1.0000	0.2169
		$-22.868 - j105.72$	0.2133			
		$-0.6667 \pm j3.0000$	0.2169			

É possível concluir que todos os métodos apresentaram resultados iniciais robustos, considerando o sinal mais simples o possível, encontrando a resposta desejada para a maioria das situações testadas. O método ERA também conseguiu filtrar os modos matemáticos Prony também foi capaz de encontrar o modo de oscilação desejado, contudo em algumas combinações de T_s e p , o resultado não foi satisfatório.

A.2 Sinal Multi-Modal

Seja o sinal $y(t)$, uma exponencial amortecida acrescida de uma constante, definido como:

$$y(t) = 2.5e^{-x/1.5} \cos(3x) - 0.6e^{-x/2} \cos(x) + 2 \quad (\text{A.2})$$

Cujos modos de oscilação são $\lambda_1 = -0.6667 \pm j3.0000$ e $\lambda_2 = -0.5000 \pm j1.0000$. A representação gráfica deste sinal se encontra na figura A.3.

Da mesma maneira que para o sinal simples, analisou-se o método dos Picos-Sucessivos sob diferentes intervalos de amostragem. Na tabela A.6, encontra-se os resultados do método.

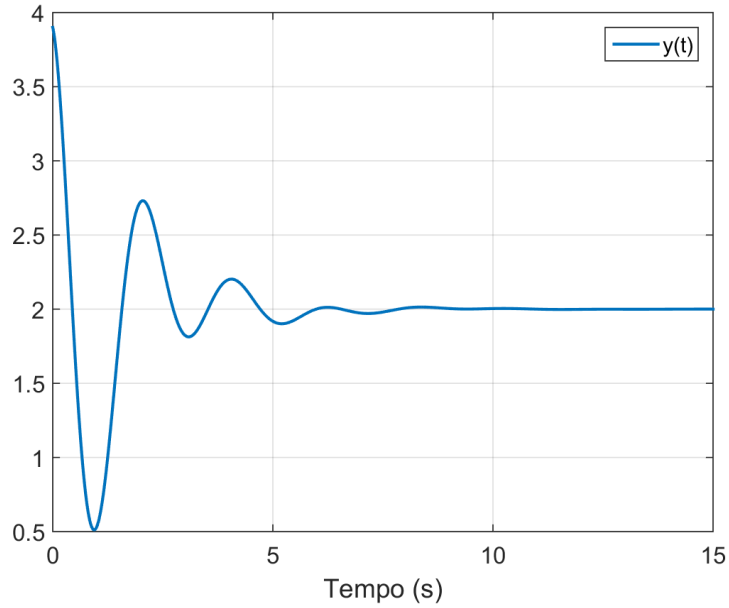


Figura A.3: Representação gráfica do sinal multi-modal a ser testado

Tabela A.6: Resultado do modo encontrado para o sinal multi-modal pelo Método dos Picos-Sucessivos para diferentes intervalos de amostragem

T_s (ms)	λ	ξ
10	$-0.6755 \pm j3.0687$	0.2150
50	$-0.6761 \pm j3.0650$	0.2154
100	$-0.6534 \pm j3.0650$	0.2085
150	$-0.6738 \pm j3.1028$	0.2122
200	$-0.6624 \pm j3.0650$	0.2113
300	$-0.6788 \pm j3.1028$	0.2137
500	$-0.5499 \pm j2.9920$	0.1808
700	$-0.3435 \pm j2.9920$	0.1141

Como o Método dos Picos-Sucessivos busca encontrar a exponencial envoltória, é possível que os parâmetros encontrados não contemplem todos os modos, sendo função de uma combinação da amplitude, fase e amortecimento de determinado modo. Para o caso, o método encontra o modo $\lambda = -0.6666 \pm j3.0000$ com relativa precisão.

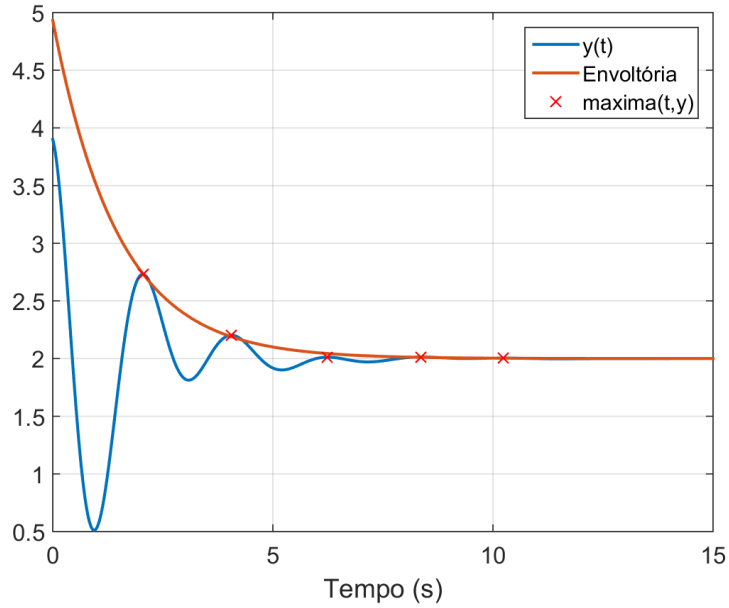


Figura A.4: Exponencial Envoltória gerada pelo Método dos Picos-Sucessivos para um sinal multi-modal

Procedimento análogo ao do sinal simples também será feito para o Método de Prony (avaliando p e T_s) e para o Método ERA (avaliando T_s). Considerando que a ordem do sistema aumentou, a tabela A.7 apresenta os resultados para o Método de Prony considerando uma ordem $p = 7$ e variando o intervalo de amostragem T_s , a tabela A.8 apresenta os resultados para o Método de Prony, mas variando a ordem p da realização; e a tabela A.9 apresenta os resultados para o Método ERA.

Tabela A.7: Resultado do Método de Prony para o sinal multi-modal com $p = 7$ e diferentes intervalos de amostragem T_s

T_s (ms)	λ_i	ξ_i	T_s (ms)	λ_i	ξ_i
10			500		
	$7.e-13 + j78.548$	$-8.e-15$		$-1.e-13 + j2.e-13$	-
	$7.e-13 - j78.548$	$-8.e-15$		$0.0174 + j0.5289$	-0.0329
	$6.e-13 + j157.08$	$-4.e-15$		$0.0860 + j6.0329$	-0.0143
	$5.e-13 - j157.08$	$-4.e-15$		$-0.6667 + j3.0000$	0.2169
	$6.e-13 + j235.62$	$-3.e-15$		$-0.6667 - j3.0000$	0.2169
	$6.e-13 - j235.62$	$-3.e-15$		$-0.5000 + j1.0000$	0.4472
	$7.e-13 + j314.16$	$-2.e-15$		$-0.5000 - j1.0000$	0.4472
30			700		
	$-5.8e-9 + j104.72$	$6.e-11$		$9.e-15$	-
	$-5.8e-9 + j78.544$	$7.e-11$		$1.3954 + j4.4880$	-0.2969
	$-5.8e-9 - j78.544$	$7.e-11$		$-0.6667 + j3.0000$	0.2169

Continua na próxima página

T_s (ms)	λ_i	ξ_i	T_s (ms)	λ_i	ξ_i
	$-5.8e-9 + j52.371$	$1.e-10$		$-0.6667 - j3.0000$	0.2169
	$-5.8e-9 - j52.371$	$1.e-10$		$-0.5000 + j1.0000$	0.4472
	$-5.8e-9 + j26.207$	$2.e-10$		$-0.5000 - j1.0000$	0.4472
	$-5.8e-9 - j26.207$	$2.e-10$		-3.0081	1.0000
50			1000		
	$-2.e-11 + j62.832$	$3.e-13$		$-1.e-14$	$-$
	$-2.e-11 + j47.127$	$4.e-13$		$-0.4556 + j3.1416$	0.1435
	$-2.e-11 - j47.127$	$4.e-13$		$-0.6667 + j3.0000$	0.2169
	$-2.e-11 + j31.424$	$5.e-13$		$-0.6667 - j3.0000$	0.2169
	$-2.e-11 - j31.424$	$5.e-13$		$-0.5000 + j1.0000$	0.4472
	$-2.e-11 + j15.727$	$1.e-12$		$-0.5000 - j1.0000$	0.4472
	$-2.e-11 - j15.727$	$1.e-12$		-0.1789	1.0000
100			1200		
	$-0.2548 + j27.092$	0.0094		$-2.e-14$	$-$
	$-0.2548 - j27.092$	0.0094		$0.0891 + j1.3615$	-0.0653
	$-0.2607 + j18.222$	0.0143		$0.0891 - j1.3615$	-0.0653
	$-0.2607 - j18.222$	0.0143		$-0.6667 + j2.2360$	0.2857
	$-1.5394 + j4.0874$	0.3524		$-0.6667 - j2.2360$	0.2857
	$-1.5394 - j4.0874$	0.3524		$-0.5000 + j1.0000$	0.4472
	-0.0040	1.0000		$-0.5000 - j1.0000$	0.4472
300			1500		
	$-6.e-12$	$-$		$0.1060 - j0.1212$	-0.6584
	$3.5444 + j10.472$	-0.3206		$2.2e-4 + j2.5e-4$	-0.6550
	$-0.1269 + j10.472$	0.0121		$0.0570 + j1.8710$	-0.0304
	$-0.6667 + j3.0000$	0.2169		$-0.4021 - j1.1543$	0.3289
	$-0.6667 - j3.0000$	0.2169		$-0.4467 + j1.1763$	0.3550
	$-0.5000 + j1.0000$	0.4472		$-0.7512 - j1.2947$	0.5020
	$-0.5000 - j1.0000$	0.4472		$-0.8411 + j1.2607$	0.5550

Tabela A.8: Resultado do Método de Prony para o sinal multi-modal com $T_s = 300ms$ e diferentes ordens p da realização

p	λ_i	ξ_i	p	λ_i	ξ_i
3			4		
	0.0034	-1.0000		$-0.7176 + j2.9320$	0.2377
	$-0.5608 + j2.8269$	0.1946		$-0.7176 - j2.9320$	0.2377
	$-0.5608 - j2.8269$	0.1946		-0.0031	1.0000
				-2.0323	1.0000

Continua na próxima página

p	λ_i	ξ_i	p	λ_i	ξ_i
5			6		
	2.e-10	-		1.e-11	-
	-0.6667 + j 3.0000	0.2169		0.6609 + j 10.472	-0.0630
	-0.6667 - j 3.0000	0.2169		-0.6667 + j 3.0000	0.2169
	-0.5000 + j 1.0000	0.4472		-0.6667 + j 3.0000	0.2169
	-0.5000 - j 1.0000	0.4472		-0.5000 ± j 1.0000	0.4472
				-0.5000 - j 1.0000	0.4472
7			8		
	-6.e-12	-		1.e-12	-1.0000
	3.5444 + j 10.472	-0.3206		-0.2977 + j 7.5570	0.0394
	-0.1269 + j 10.472	0.0121		-0.2977 - j 7.5570	0.0394
	-0.6667 + j 3.0000	0.2169		-0.6667 + j 3.0000	0.2169
	-0.6667 - j 3.0000	0.2169		-0.6667 - j 3.0000	0.2169
	-0.5000 + j 1.0000	0.4472		-3.1277 + j 10.472	0.2862
	-0.5000 - j 1.0000	0.4472		-0.5000 + j 1.0000	0.4472
				-0.5000 - j 1.0000	0.4472
9			10		
	1e-12	-		-2.e-13 + j 1.e-14	-
	0.9642 + j 4.5394	-0.2078		1.497 - j 6.0012	-0.2420
	0.9642 - j 4.5394	-0.2078		1.0982 + j 6.0391	-0.1789
	-0.3935 + j 8.7961	0.0447		1.6723 + j 10.416	-0.1585
	-0.3935 - j 8.7961	0.0447		-1.6529 - j 8.1004	0.1999
	-0.6667 + j 3.0000	0.2169		-1.7762 + j 8.1719	0.2124
	-0.6667 - j 3.0000	0.2169		-0.6667 + j 3.0000	0.2169
	-0.5000 + j 1.0000	0.4472		-0.6667 - j 3.0000	0.2169
	-0.5000 - j 1.0000	0.4472		-0.5000 + j 1.0000	0.4472
				-0.5000 - j 1.0000	0.4472

O Método de Prony apresentou problemas para encontrar os modos desejados $\lambda_1 = 0.6667 \pm j3.0000$ e $\lambda_2 = 0.5000 \pm j1.0000$ em algumas situações ($T_s = 10ms, 30ms, 50ms, 100ms$ para $p = 7$). Naturalmente, para uma ordem $p = 3$ menor que a ordem real do sistema, o método não conseguiu encontrar todos os modos, apesar de ter encontrado o modo $\lambda_i = 0.6667 \pm j3.0000$ dentro de uma precisão razoável. Este resultado indica que subestimar a ordem do sistema não apenas gera uma realização cujos modos não são todos do sistema real, mas também os modos encontrados perderão precisão. Observa-se ainda que o modo $\lambda = 0.6667 \pm j3.0000$ não foi corretamente encontrado para $T_s = 1200ms$ e $T_s = 1500ms$, assim como no caso do sinal simples. Naturalmente, tal ocorrência é decorrente da relação entre o intervalo de amostragem e a frequência de oscilação do modo.

Para as configurações com bons resultados, observa-se o mesmo problema visto no caso de sinal simples: os modos matemáticos podem não apresentar características óbvias que os distingam dos modos eletromecânicos e dos modos reais do

sistema, de maneira que heurísticas de classificação são necessárias.

Tabela A.9: Resultado do Método ERA para o sinal multi-modal com diferentes intervalos de amostragem T_s

T_s (ms)	λ_i	γ_i	ξ_i	T_s (ms)	λ_i	γ_i	ξ_i
10	$2.e-14$	1.0000	-	500	$-2.e-15$	1.0000	-
	$-0.6667 \pm j3.0000$	1.0000	0.2169		$-0.6667 \pm j3.0000$	1.0000	0.2169
	$-0.5000 \pm j1.0000$	1.0000	0.4472		$-0.5000 \pm j1.0000$	1.0000	0.4472
30	$-7.e-15$	1.0000	-	700	$6.e-16$	1.0000	-
	$-0.6667 \pm j3.0000$	1.0000	0.2169		$-0.6667 \pm j3.0000$	1.0000	0.2169
	$-0.5000 \pm j1.0000$	1.0000	0.4472		$-0.5000 \pm j1.0000$	1.0000	0.4472
50	$-9.e-15$	1.0000	-	1000	$9.e-16$	1.0000	-
	$-0.6667 \pm j3.0000$	1.0000	0.2169		$-0.6667 \pm j3.0000$	1.0000	0.2169
	$-0.5000 \pm j1.0000$	1.0000	0.4472		$-0.5000 \pm j1.0000$	1.0000	0.4472
100	$2.e-15$	1.0000	-	1200	$2.e-05$	0.9999	-
	$-0.6667 \pm j3.0000$	1.0000	0.2169		$-0.9709 \pm j1.7969$	0.9980	0.4754
	$-0.5000 \pm j1.0000$	1.0000	0.4472		-0.82489	0.9652	1.0000
300	$-4.e-15$	1.0000	-	1500	$-0.6767 \pm j1.3216$	0.9998	0.4558
	$-0.6667 \pm j3.0000$	1.0000	0.2169		-0.0004	1.0000	1.0000
	$-0.5000 \pm j1.0000$	1.0000	0.4472				

O Método ERA para o sinal multi-modal apresentou resultados coerentes com o observado no caso de sinal simples: ambos os modos desejados foram encontrados para todos os intervalos de amostragem exceto para $T_s = 1200ms$ e $T_s = 1500ms$. É possível observar nesses dois casos que o método já não encontra mais dois pares de polos conjugados e que o parâmetro de coerência modal γ apresentou valores diferentes de 1.0000. Este efeito se deve a existência de algum modo do sistema mas que não pode ser encontrado ou devido ao truncamento causado pela heurística de realização de estado mínimo ou devido ao baixo número de amostras coletadas.

Compara-se os três sinais, da mesma maneira que para o sinal simples, utilizando desta vez um intervalo de amostragem $T_s = 300ms$, de acordo com a tabela A.10:

Tabela A.10: Comparação entre os métodos para o sinal multi-modal e $T_s = 300ms$

Picos-Sucessivos		Prony ($p = 7$)		ERA		
λ_i	ξ_i	λ_i	ξ_i	λ_i	γ_i	ξ_i
$-0.6788 \pm j3.1028$	0.2137					
		$-6e-12$	-	$-4.e-15$	1.0000	-
		$3.5444 + j10.472$	-0.3206	$-0.6667 \pm j3.0000$	1.0000	0.2169
		$-0.1269 + j10.472$	0.0121	$-0.5000 \pm j1.0000$	1.0000	0.4472
		$-0.6667 \pm j3.0000$	0.2169			
		$-0.5000 \pm j1.0000$	0.4472			

Com esta nova etapa na comparação, percebe-se que os três métodos ainda foram capazes de identificar corretamente a dinâmica do sistema, dentro de um conjunto de parâmetros favorável. Para o método dos Picos-Sucessivos, a exponencial encontrada de fato é envoltória e consegue representar bem um dos modos do sistema; para o Prony, o domínio do intervalo de amostragem se tornou mais reduzido, mas ainda é capaz de encontrar corretamente os modos; e o Método ERA mostrou-se bastante robusto, encontrando os dois modos com um domínio maior que do método de Prony.

A.3 Sinal com Ruído

O objetivo desta etapa é analisar os métodos sob a inserção de uma pequena perturbação. Geralmente, para análises do tipo, está se testando um algoritmo frente a uma medição ruidosa e representativa de uma medição real; contudo, simulações computacionais também adicionam erros numéricos em suas respostas, ainda que limitados.

Seja o sinal $y(t)$, uma exponencial amortecida acrescida de uma constante e de ruído branco (gaussiano), definido como:

$$y(t) = 2.5e^{-x/1.5} \cos(3x) + 2 + e_g(t) \quad (\text{A.3})$$

Sendo $e_g(t)$ a função gerada por um gerador de ruído branco gaussiano com relação sinal-ruído de $100dB$ (eq. (3.45)), valor compatível com um ruído esperado em uma simulação computacional. A figura A.5 mostra o sinal ruidoso e a parcela $e_g(t)$ (gerada com uma semente conhecida) que compõe o sinal $y(t)$.

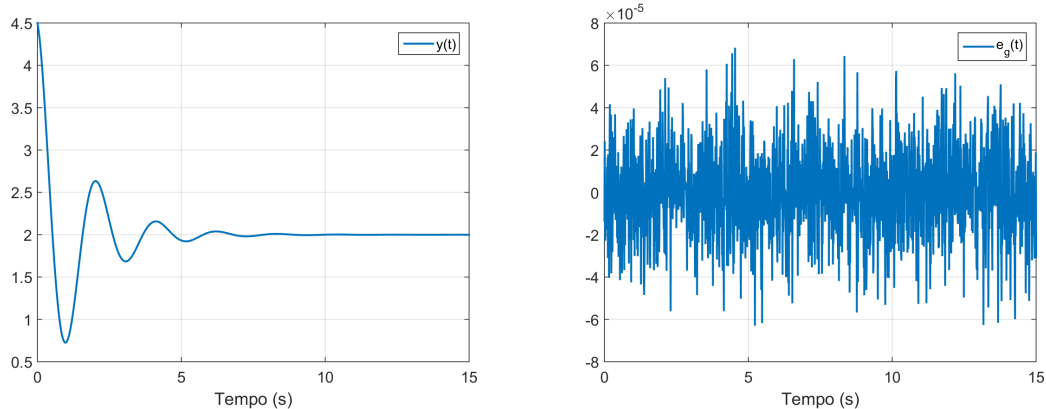


Figura A.5: Representação gráfica do sinal com ruído ser testado e a parcela ruidosa

Como o objetivo é analisar brevemente o efeito do ruído de medição nos métodos, não se propõe fazer tantas simulações com variados intervalos de amostragem. Para o caso do Método dos Picos-Sucessivos, a figura A.6 contém as respostas para $T_s = 10ms$ e $T_s = 100ms$ e a tabela A.11 o resultado da envoltória encontrada.

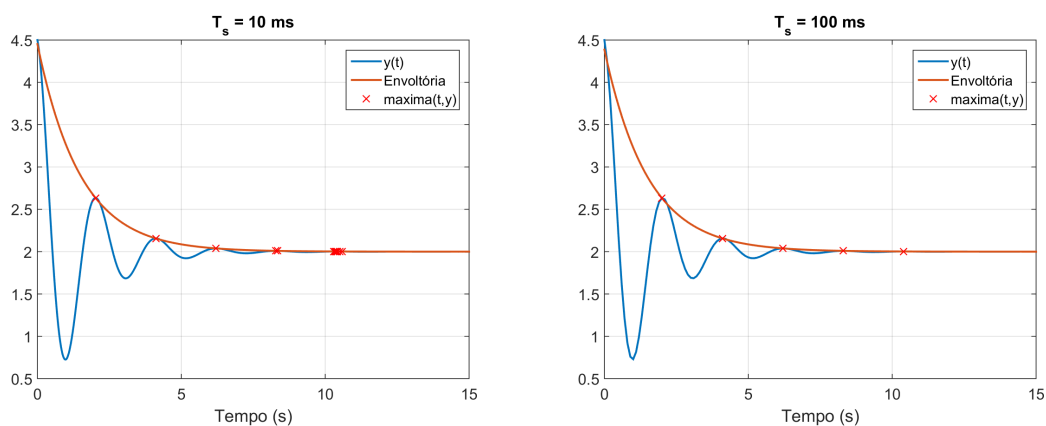


Figura A.6: Influência do intervalo de amostragem no Método dos Picos-Sucessivos

Tabela A.11: Resultado do modo encontrado para o sinal com ruído pelo Método dos Picos-Sucessivos para diferentes intervalos de amostragem

T_s (ms)	λ	ξ
10	$-0.6691 \pm j8.0648$	0.0827
100	$-0.6639 \pm j2.9920$	0.2166

É possível observar que a exponencial envoltória encontrada é bem ajustada nos dois casos (parte real de λ), contudo, a frequência de oscilação é sensível ao ruído devido à simplicidade adotada para estimação desta frequência. O ruído de simulação pode ser encarado como uma composição de sinais senoidais de altíssimas frequência. Dito isso, um intervalo de amostragem maior mitiga o efeito deste ruído em decorrência do teorema de Nyquist-Shannon.

Pode-se contornar o problema do ruído de simulação adicionando uma heurística simples que verifica, por exemplo, o valor do máximo local encontrado em relação ao máximo global. Sabendo a ordem de grandeza na qual o ruído está confinado (e isso é um dado conhecido, determinado diretamente ou indiretamente pelas constantes de tolerância e convergência do simulador utilizado), pode-se definir um valor de *threshold* e descartar pontos que não satisfaçam condição.

Para o Método de Prony e para o Método ERA, fez-se duas simulações com intervalos de amostragem $T_s = 30ms$ e $T_s = 100ms$. Optou-se por trocar o intervalo de $T_s = 10ms$ para um maior pois, para o Método de Prony, o resultado com o caso simples já apresentava uma resposta não tão precisa quanto os demais casos analisados. Assim, para efeito de isolar a contribuição do ruído, escolheu-se um intervalo um pouco maior. A tabela A.12 contém o resultado das duas simulações para o método de Prony.

Tabela A.12: Resultado do Método de Prony para o sinal com ruído, $p = 5$ e diferentes intervalos de amostragem T_s

T_s (ms)	λ_i	ξ_i	T_s (ms)	λ_i	ξ_i
30			100		
	2.4e-7	-		-1.2e-7	-
	-15.551 ± j77.549	0.1961		0.0825 ± j26.238	-0.0031
	-0.6667 ± j3.0000	0.2169		-0.6667 ± j3.0000	0.2169

A introdução do pequeno ruído não foi capaz de alterar o resultado do método, como era possível supor. Como o método busca encontrar uma realização de ordem conhecida p , a inserção de valores ínfimos não deveria ser capaz de alterar a identificação de um modo do sistema, contudo, o modo matemático encontrado foi outro, evidenciando a sua natureza.

Também simulou-se com os intervalos $T_s = 30ms$ e $T_s = 100ms$ no Método ERA. Os resultados se encontram na tabela A.13.

Tabela A.13: Resultado do Método ERA para o sinal com ruído com diferentes intervalos de amostragem T_s e $\varepsilon = 10^{-16}$

T_s (ms)	λ_i	γ_i	ξ_i	T_s (ms)	λ_i	γ_i	ξ_i
30				100			
	-116.13	0.0416	1.0000		-0.5526 ± j9.7784	0.0205	0.0564
	-15.738 ± j104.72	0.0465	0.1486		-7.5519	0.0238	1.0000
	-1.8969 ± j27.534	0.0588	0.0687		-0.8736 ± j13.250	0.0751	0.0657
	-0.2668 ± j101.17	0.1329	0.0026		-0.3096 ± j29.673	0.1053	0.0104
	-0.4941 ± j55.564	0.1518	0.0088		-5.3421 ± j28.605	0.2056	0.1835
	-2.1128	0.1770	1.0000		-0.5242 ± j12.836	0.2983	0.0408
	-0.4286 ± j96.957	0.1862	0.0044		-0.3333 + j15.178	0.3104	0.0219
	-0.8993 ± j63.535	0.2260	0.0141		-1.1419	0.3971	1.0000
	-2.8053 ± j59.157	0.2490	0.0473		-0.2988 + j31.416	0.4644	0.0095
	-1.0867 ± j38.589	0.2516	0.0281		-0.3592 ± j21.597	0.5156	0.0166
	-1.3648 ± j16.064	0.2811	0.0846		0.0087 ± j8.6382	0.5186	-0.0010
	-0.7358 ± j10.465	0.2946	0.0701		-0.4736 ± j26.914	0.5578	0.0175
	-0.5390 ± j6.8362	0.3082	0.0786		-0.1932 ± j28.569	0.5737	0.0067
	-0.1125 ± j59.614	0.3109	0.0018		-0.5229 ± j2.0045	0.5830	0.2524
	-2.9631 ± j74.062	0.3433	0.0399		-0.1799 ± j11.377	0.5897	0.0158
	-0.5760 ± j13.320	0.3444	0.0432		-0.1084 ± j20.861	0.6368	0.0051
	-0.4574 ± j102.33	0.3524	0.0044		-0.0884 ± j15.894	0.6621	0.0055
	-0.1343 ± j5.7084	0.3722	0.0235		-0.7983 ± j4.0760	0.6675	0.1922
	-0.7377 ± j71.818	0.3896	0.0102		-0.2133 ± j25.837	0.7148	0.0082
	-0.2957 ± j67.439	0.4011	0.0043		-0.2267 ± j24.350	0.7892	0.0093
	-0.8645 ± j81.471	0.4167	0.0106		-0.3521 ± j7.1223	0.8346	0.0493
	-0.2679 ± j61.179	0.4382	0.0043		-0.2306 ± j23.242	0.8472	0.0099
	-0.4765 ± j53.020	0.4407	0.0089		-0.0168 ± j19.125	0.8892	0.0008
	-0.4371 ± j66.018	0.4413	0.0066		0.0899 ± j5.5936	0.9322	-0.0160
	-0.2047 ± j70.079	0.4637	0.0029		-0.1107 ± j17.245	0.9693	0.0064
	-0.3821 ± j30.377	0.4680	0.0125		-0.6666 ± j3.0000	1.0000	0.2169
	-0.1310 ± j95.777	0.4736	0.0013		-1.5e-7	1.0000	1.0000
	-0.2709 ± j39.372	0.4851	0.0068				
	-0.2551 ± j4.1355	0.4861	0.0615				
	-0.2561 ± j12.056	0.4867	0.0212				
	-0.2686 ± j64.686	0.4952	0.0041				
	-0.1201 ± j25.843	0.5073	0.0046				
	0.0393 ± j50.118	0.5263	-0.0007				
	-0.3542 ± j56.705	0.5447	0.0062				
	-0.2924 ± j33.032	0.5632	0.0088				
	-0.4450 ± j1.4446	0.5664	0.2944				

Continua na próxima página

T_s (ms)	λ_i	γ_i	ξ_i	T_s (ms)	λ_i	γ_i	ξ_i
30				100			
	$-0.1861 \pm j72.624$	0.5861	0.0025				
	$-0.1825 \pm j16.192$	0.6142	0.0112				
	$-0.4726 \pm j35.994$	0.6161	0.0131				
	$-0.3556 \pm j40.630$	0.6215	0.0087				
	$-0.3123 \pm j82.006$	0.6232	0.0038				
	$-0.5889 \pm j19.363$	0.6417	0.0304				
	$-0.3565 \pm j32.400$	0.6506	0.0110				
	$-0.2492 \pm j74.208$	0.6532	0.0033				
	$-0.2412 \pm j103.31$	0.6619	0.0023				
	$0.0650 \pm j85.210$	0.6693	-0.0007				
	$-0.3628 \pm j62.734$	0.6752	0.0057				
	$-0.4832 \pm j77.239$	0.6758	0.0062				
	$-0.1090 + j104.72$	0.6815	0.0010				
	$-0.0227 \pm j87.897$	0.6889	0.0002				
	$-0.1589 \pm j22.015$	0.6905	0.0072				
	$-0.2801 \pm j53.874$	0.6928	0.0051				
	$-0.6661 \pm j8.4590$	0.6939	0.0785				
	$-0.1656 \pm j27.786$	0.6947	0.0059				
	$-0.3367 \pm j99.669$	0.7116	0.0033				
	$-0.3375 \pm j24.563$	0.7260	0.0137				
	$-0.1220 \pm j80.040$	0.7295	0.0015				
	$-0.1975 \pm j29.572$	0.7311	0.0066				
	$-0.0998 \pm j41.852$	0.7350	0.0023				
	$-0.2784 \pm j58.044$	0.7367	0.0047				
	$-0.4019 \pm j20.446$	0.7382	0.0196				
	$-0.1492 \pm j94.535$	0.7774	0.0015				
	$0.0332 \pm j90.412$	0.8085	-0.0003				
	$-0.1430 \pm j75.924$	0.8205	0.0018				
	$-0.2335 \pm j34.611$	0.8209	0.0067				
	$0.0279 \pm j44.993$	0.8210	-0.0006				
	$-0.0131 \pm j91.906$	0.8230	0.0001				
	$-0.1736 \pm j14.407$	0.8298	0.0120				
	$-0.1442 \pm j18.429$	0.8312	0.0078				
	$-0.2999 \pm j9.4015$	0.8363	0.0318				
	$-0.1294 \pm j23.278$	0.8424	0.0055				
	$-0.0527 \pm j-78.72$	0.8502	0.0006				
	$-0.3560 \pm j-46.31$	0.8505	0.0076				
	$0.0844 \pm j84.039$	0.8610	-0.0010				
	$-0.1970 \pm j68.571$	0.8656	0.0028				
	$-0.3466 \pm j93.519$	0.8698	0.0037				
	$-0.0721 \pm j98.136$	0.8776	0.0007				

Continua na próxima página

T_s (ms)	λ_i	γ_i	ξ_i	T_s (ms)	λ_i	γ_i	ξ_i
30				100			
	$-0.1685 \pm j37.325$	0.8782	0.0045				
	$-0.1583 \pm j86.249$	0.8820	0.0018				
	$-0.1401 \pm j48.685$	0.8965	0.0028				
	$-0.0503 \pm j51.535$	0.9187	0.0009				
	$-0.1190 \pm j47.101$	0.9453	0.0025				
	$0.1164 \pm j43.402$	0.9610	-0.0026				
	$-0.0702 \pm j89.163$	0.9755	0.0007				
	$-0.6667 \pm j3.0000$	1.0000	0.2169				
	$1.4e-8$	1.0000	-1.0000				

Como o Método ERA busca uma realização de estado mínima que reproduza os sinais de saída $\bar{y}(t)$ informados, modos que visam a reprodução do ruído são acrescentados à resposta inicialmente encontrada na tabela A.4. Como o ruído adicionado é um ruído do tipo branco gaussiano, sua composição modal consiste em muitas componentes senoidais. Conforme mencionado anteriormente, a contribuição negativa do ruído para o resultado está relacionada com a frequência de amostragem, observando-se uma redução drástica na ordem do sistema encontrado ao se aumentar o intervalo de amostragem de $T_s = 30ms$ para $T_s = 100ms$.

Durante a descrição do método, se definiu o parâmetro γ , responsável por medir a coerência modal de determinado modo. Quando imprecisões na medição surgem e modos matemáticos são gerados, este parâmetro passa a classificar os modos encontrados. Nos dois casos apresentados, $\gamma = 1.000$ para os modos de fato do sistema $\lambda_1 = -0.6666 \pm j3.0000$ e $\lambda_2 = 0$, mas $\gamma < 1.000$ para os modos que se sabem ser matemáticos. Um dos pontos do algoritmo a ser determinado seria a escolha do valor de γ que separa os modos de fato dos modos matemáticos. Juang e Papa, ao apresentar o método[24], definiu como o conjunto de autovalores mais *confiáveis* aqueles cujos γ fossem maiores que 0.95; muito embora os sinais tratados em seu artigo contivessem ruído de medição de fato e não apenas um ruído de simulação.

Até este ponto, utilizou-se no Método ERA o parâmetro $\varepsilon_{\text{threshold}} = 10^{-16}$; o que na prática significa dizer que não se estava analisando os valores singulares encontrados durante o algoritmo. Como os sinais analisados não apresentavam ruído de simulação (ou qualquer outro ruído), a realização encontrada era de fato a realização mínima. Mas com a inserção de ruído, a análise de valores singulares torna-se uma poderosa ferramenta matemática. Alterando-se ε , encontrou-se:

Tabela A.14: Resultado do Método ERA para o sinal simples com diferentes intervalos de amostragem T_s e $\varepsilon = 10^{-4}$

T_s (ms)	λ_i	γ_i	ξ_i	T_s (ms)	λ_i	γ_i	ξ_i
30				100			
	-6.6e-8	1.0000	-		-2.1e-7	1.0000	-
	-0.6667 ± j3.0000	1.0000	0.2169		-0.6667 ± j3.0000	1.0000	0.2169

Com a inclusão da análise dos valores singulares (com $\varepsilon_{\text{threshold}}$), os modos numéricos devido ao ruído de simulação não mais foram encontrados. Como é esta análise que determina qual será a ordem p do sistema e como a parte computacionalmente mais intensiva acontece após esta análise (cálculo de autovalores e autovetores e inversão de matriz), um parâmetro apropriado de limite garante que o método entregará bons resultados e de maneira mais célere.

Apêndice B

Código Fonte de Alguns Algoritmos Desenvolvidos

B.1 Código Matlab do Método dos Picos Sucessivos

```
function [ ksi, wn, alpha, beta ] = picos_sucessivos( x,y )
% Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ
% Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de
% Engenharia - Coppe
%
% Investigação de Novas Ferramentas para a Análise de Segurança
% Estática e Dinâmica de Sistemas de Potência
%
% Nicolás Abreu Rocha Leite Netto
% Dezembro de 2016
% -----
% function picos_sucessivos.m
% Encontra a exponencial envoltória e retorna os parâmetros de
% amortecimento e frequência do modo equivalente identificado. Retorna
% também os parâmetros "alpha" e "beta" da exponencial envoltória
% -----
% Encontra o maxima
[y2,i] = findpeaks(y);
x2 = x(i);

% Encontra o valor de regime e elimina do sinal
desv = mean(y(end-20:end));
y2 = y2-desv;
```

```

% Seleciona pontos que não sejam muito pequenos
x2 = x2(y2>1e-3);
y2 = y2(y2>1e-3);
% Chama a função que faz o ajuste da exponencial
[alpha,beta] = exp_fitting(x2,y2);

% Determina a frequência de oscilação
n = numel(x2);
td=zeros(n-1,1);
for i=2:n
td(i-1) = x2(i)-x2(i-1);
end
wn = 2*pi/mean(td);

% Calcula o amortecimento do sinal
ksi = - beta/ sqrt( beta^2 + wn^2 );
end

% -----
% -----

function [ alpha,beta ] = exp_fitting( x,y )
% Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ
% Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de
% Engenharia - Coppe
%
% Investigação de Novas Ferramentas para a Análise de Segurança
% Estática e Dinâmica de Sistemas de Potência
%
% Nicolás Abreu Rocha Leite Netto
% Dezembro de 2016
% -----
% function exp_fitting
% Encontra os parâmetros "alpha" e "beta" de uma função do tipo:
%      y = alpha * exp(beta * x)
% Utiliza o método dos mínimos quadrados ponderados
% -----
z = log(y);

a11 = sum(y);

```

```
a12 = sum(y.*x);
a22 = sum(y.*x.^2);

A_LU = [ a11 a12; a12 a22];
b_LU = [sum(y.*z); sum(y.*z.*x)];

resp = linsolve(A_LU,b_LU);
a = resp(1);
b = resp(2);

alpha = exp(a);
beta = b;
end
```

B.2 Código Fortran de Lista Encadeada de Reais

```
module lnkd_real_module
! Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ
! Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de
! Engenharia - Coppe
!
! Investigação de Novas Ferramentas para a Análise de Segurança
! Estática e Dinâmica de Sistemas de Potência
!
! Nicolas Abreu Rocha Leite Netto
! Dezembro de 2016
! -----
! Módulo que contém as instruções para a formação de uma lista de reais
! através das estruturas de Fortran 90/95
! -----
implicit none

type lnkd_real_node
    real(kind=8)                :: value = 0
    type(lnkd_real_node), pointer :: next => null()
end type

type lnkd_real_list
    type(lnkd_real_node), pointer :: head => null()
    type(lnkd_real_node), pointer :: tail => null()
contains
    procedure append => append_lnkd_real_list
    procedure prepend => prepend_lnkd_real_list
end type lnkd_real_list

private append_lnkd_real_list
private prepend_lnkd_real_list

contains
subroutine append_lnkd_real_list( self, value )
    ! Adiciona value num elemento a ser inserido ao final da lista
    class(lnkd_real_list), intent(inout) :: self
    real(kind=8), intent(in)              :: value
    type(lnkd_real_node), pointer         :: newNode

    allocate( newNode )
```

```

newNode%value = value

if (.not. associated(self%head)) then
    self%head => newNode
else
    self%tail%next => newNode
endif

self%tail => newNode
end subroutine

subroutine prepend_lnkd_real_list( self, value )
    ! Adiciona value num elemento a ser inserido ao inicio da lista
    class(lnkd_real_list), intent(inout)    :: self
    real(kind=8), intent(in)                :: value
    type(lnkd_real_node), pointer           :: newNode

    allocate( newNode )
    newNode%value = value

    if (.not. associated(self%head)) then
        self%tail => newNode
    else
        newNode%next => self%head
    endif

    self%head => newNode
end subroutine
end module

```